



FÜÜSIKA PRAKTIKUM ARSTITEADUSKONNA ÜLIÕPILASTELE

II

1987

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL
Geofüüsika kateeder

FÜÜSIKA PRAKTIKUM
ARSTITEADUSKONNA
ÜLIÕPILASTELE

II

Koostanud T.Müürsepp

TARTU 1987

Kinnitatud füüsika-keemiateaduskonna nõukogus
23. septembril 1987.a.

Kessóna

Kogumikus sisalduvate tööde ühiseks põhiteemaks on vahelduvvool.

Kõigepealt tutvutakse põhjalikult ostsillograafi tööpõhimõttega ning tema kasutamisega vahelduvvoolu uurimiseks.

Seejärel käsitletakse vahelduvvooluga seostuvaid suurusinduktiivsust, mahtuvust ja impedantsi.

Järgnevalt uuritakse võimalusi vahelduvvoolu muundamiseks - alaldamine ja võimendamine. Selle alateema raamides tutvutakse elektronlambi, pooljuhtdiodi ja transistori tööfüüsikaliste alustega.

Oma olemuselt on selle kogumiku tööd ettevalmistavaks etapiks meditsiinis kasutatavate aparatuuride ja uurimismeetoditega tutvumiseks (vt. Füüsika praktikum Arstiteaduskonna üliõpilastele. III).

Sisukord

Eessõna	3
1. Elektronostsillograafiga tutvumine	5
2. Induktiivsuse ja mahtuvuse määramine vahelduvvoolu ahelas	23
3. Tutvumine induktiivse anduriga	30
4. Vahelduvvoolu alaldamine	35
5. Transistori staatiliste karakteristikute määramine	49
6. Takistussidestusega võimendi uurimine	60

ELEKTRONOSTSILLOGRAAFIGA TUTVUMINE

Tööülesanne

Tutvumine elektronostsillograafi ehituse ja mõnede kasutamisvõimalustega.

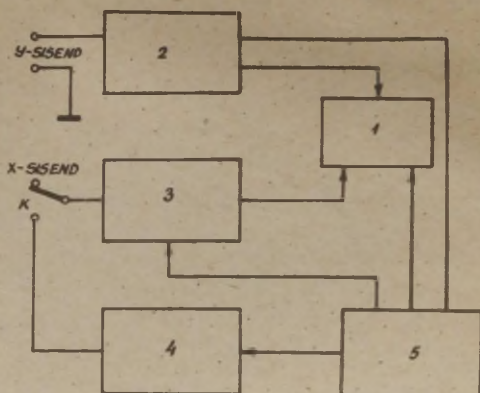
Töövahendid

Elektronostsillograaf C1-1, voltmeeter, trafo, autotrafo, helisagedusgeneraator, lampvoltmeeter, juhtmed.

Ostsillograafi ehitus ja tööpõhimõte

1. Ostsillograafi otstarve ja plokkskeem. Elektronostsillograaf on riist kiirete elektriliste protsesside jälgimiseks (vajaduse korral ka fotografeerimiseks). Ostsillograafi abil võib jälgida mingit protsessi iseloomustavate kõverate (s.t. protsessis muutuvate füüsikaliste suuruste vaheliste sõltuvuste graafikute) kuju, mõõta protsessi või selle osade kestust, protsessi sagedust. Sageli kasutatakse ostsillograafi vahelduvpinge mõõtmisel; asendamatu on ta üksikute lühiajaliste pingepulsside mõõtmisel.

Elektronostsillograafi töö analüüsimisel jagatakse see funktsionaalseteks sõlmedeks ehk plokkideks (joon. 1). Ostsillograafi põhiplokkideks on elektronikiiretoru, sisendsignaali võimendid, kallutuspinge generaator ja toiteplokk. Noolega on tähistatud plokkide vastasikused seosed.



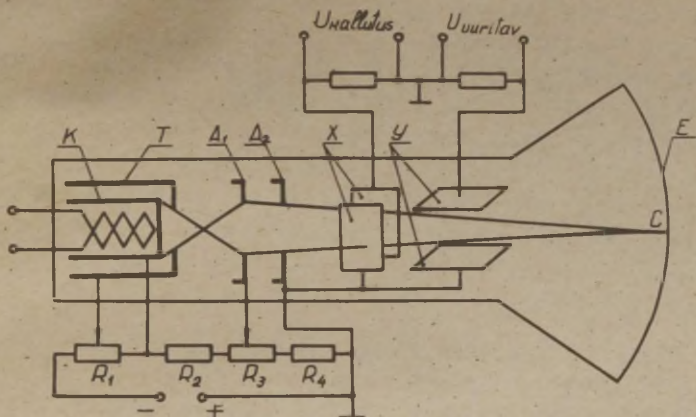
Joon. 1. Elektronostsillograafi plokkskeem.

1 - elektronkiiretoru; 2 - y-telje võimendi; 3 - x-telje võimendi; 4 - kallutuspinge generaator; 5 - toiteplokk.

2. Elektronkiiretorud võivad olla kahte tüüpi: elektrostaatilised või magnetilised. Esimest tüüpi torudes toimub kiire kallutamine elektrivälja, teistes - magnetvälja mõjul. Siin vaatleme elektrostaatilise kallutusega toru, sest ostsillograafides kasutatakse peaaegu eranditult selliseid.

Elektronkiiretoru ehitus on järgmine (joon. 2). Elektronide allikaks on kaudse küttega silindriline katood K, mida kuumutatakse kütteniidiga K_ü. Katoodi ümbritseb avaga varustatud tüüriv elektrood T, millele antakse katoodi suhtes väike negatiivne pinge. Muutes tüüriva elektroodi negatiivset pinget, muudame väljuvate elektronide arvu, millest omakorda sõltub toru fluorestseerival ekraanil tekkiva elektronkiire jälje heledus.

Elektroodid A_1 ja A_2 moodustavad anoodide süsteemi, neile antakse kõrge positiivne pinge katoodi suhtes. Elektrivälja toimel, mis tekib katoodi ja tüüriva elektroodi ning esimese anoodi A_1 vahele rakendatud pinge tõttu, koonduvad katoodi pinnalt eraldunud elektronid punktis B esimese anoodi lähedal. Pärast punkti B elektronkiirte kimp laieneb, sest väljatugevus silindrikujulise esimese anoodi sees on lähedane nullile. Esimese ja teise anoodi vahel kõverdab elektrivälja uuesti elektronide trajektoore, lähendades neid toru



Joon. 2. Elektrostaatilise kallutusega
elektronkiiretoru.

teljele ja elektronkiirte kimp fokuseerub ekraanil punktis C. Ekraan E on valmistatud fluorestseerivast materjalist, mis elektronidega pommitamisel hakkab vastavas kohas helenema (nn. katoodluminestsentsi nähtus).

Elektroodide süsteeme, mis koondavad või hajutavad elektronkiirte kimpu, nimetatakse elektronoptilisteks läätsedeks.

Kogu kirjeldatud süsteemi, mis koosneb katoodist, tüürist elektroodist ja anoodidest, nimetatakse elektronkahuriks.

Takistid R_1 , R_2 , R_3 ja R_4 moodustavad pingeljagaja, millelt antakse elektroodidele vastavad pinged. R_1 abil muudetakse täpi heledust, R_3 abil aga fokuseeritakse kiirt.

Elektronkiire tee ja seega ka fokuseerimispunkti asukoha muutmiseks on torus kaks paari omavahel risti asetatud kallutusplaate: vertikaal- ehk x-plaadid ja horisontaal- ehk y-plaadid. Kallutusplaatide paarid kujutavad endast tasaparralleelseid kondensaatoreid. Kui kõigile kallutusplaatidele anda anoodi A_2 potentsiaal, siis plaadid ei mõjuta elektrone ja kiire jälg tekib ekraani tsentrisse. Kui aga rakendada kallutusplaatide vahele pinge (tavaliselt vähendatakse ühe ja suurendatakse teise plaadi potentsiaali, nii et kesk-

mine potentsiaal jääks võrdseks A_2 osaga), siis kalduvad elektronid kondensaatori homogeenses elektriväljas liikudes esialgselt suunast kõrvale. Kiire jälje nihe ekraani keskpunktist osutub võrdeliseks plaatide vahele rakendatud pingega. Kahe paari kallutusplaatide vahelise pinge muutmisega saab viia kiire jälje mistahes punkti ekraanil, kusjuures pinge muutus ja jälje nihe ekraanil vertikaal- või horisontaalsihis on üheselt (võrdeliselt) seotud. See võimaldab joonistada ekraanil kallutusplaatidele rakendatud kahe muutuva pinge (elektrilise signaali) vahelise sõltuvuse graafikut (ostsillogrammi).

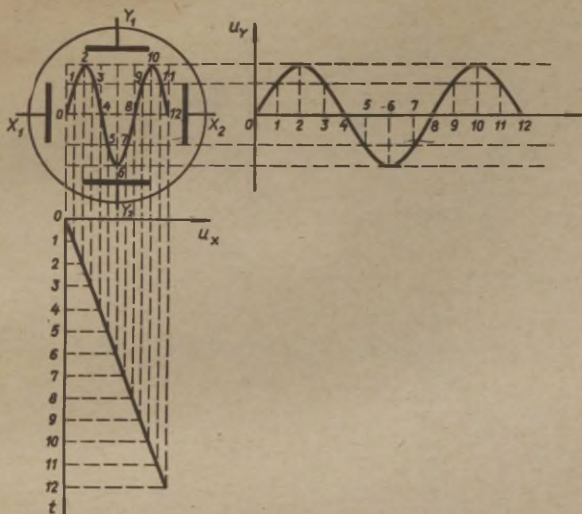
3. Ostsillogrammi tekitamine. Olgu näiteks x-plaatidele antud ajas lineaarselt muutuv pinge U_x , y-plaatidele aga ajas sinusoidaalselt muutuv pinge U_y . Siis elektronikiire jälje x- ja y-koordinaadid (horisontaal- ja vertikaalnihked ekraani keskpunktist) sõltuvad ajast järgmiselt:

$$\begin{cases} x = a t, \\ y = b \sin (\omega t + \varphi). \end{cases} \quad (1)$$

Pinge U_x nihutab elektronkiirt x-telje sihis, pinge U_y aga y-telje sihis. Jälgides summaarse nihke muutumist ajas, saame ostsillograafi ekraanil sinusoidi, mille tekkimise protsessi ekraanil selgitab joonis 3. Et U_x oli võrdeline ajaga, siis näitab ostsillogramm U_y sõltuvust ajast.

Kui rakendada nii x-telje plaatidele kui ka y-telje plaatidele ajas sinusoidaalselt muutuv pinge, siis olenevalt sageduste, amplituudide ja faaside vahekorrast ekraanil tekivad erinevad kujundid (ostsillogrammid). Näiteks võrdsete sageduste ja faaside puhul saame ekraanil sirge joone. Võrdsete sageduste, kuid erinevate faaside puhul tekib ellips (joon. 4). Erinevate sageduste puhul saadavad ostsillogrammid on komplitseeritumad, neid nimetatakse Lissajous' kujunditeks (joon. 5). Joonisel 5 vasakult paremale muutub x-telje sihilise ja y-telje sihilise võnkumise sageduste suhe $f_x:f_y$. Ülaile alla muutub nimetatud võnkumiste faasivahe.

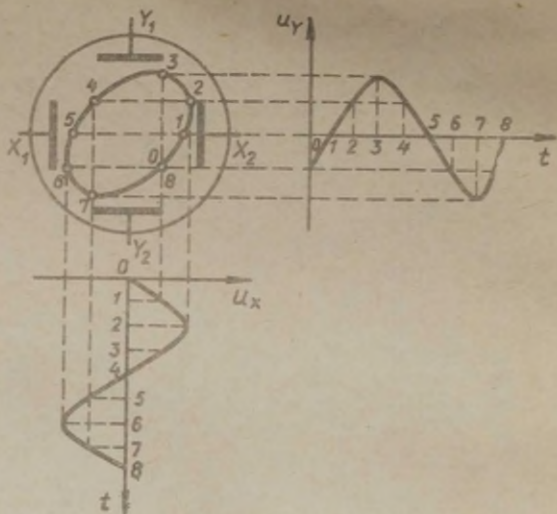
Lissajous' kujundeid kasutatakse plaatidele antavate pingete sageduste ja faaside võrdlemisel.



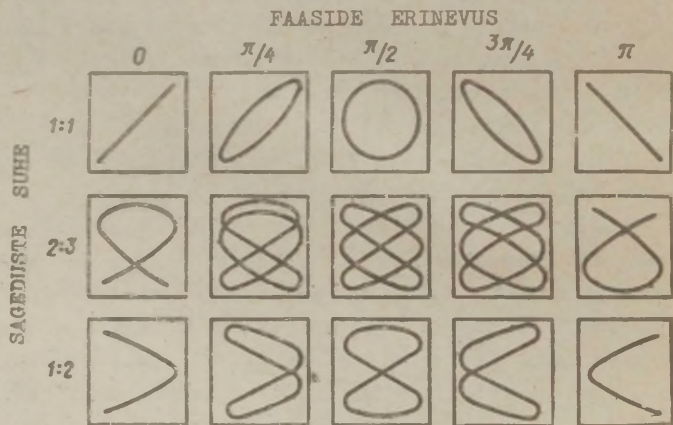
Joon. 3. Ostsillogrammi tekkimine,
kui x-telje sihis muutub pinge ajas lineaarselt,
y-telje sihis aga sinusoidaalselt.

Meditisiinilises praktikas kasutatakse seda põhimõtet vek-
torelektrokardioskoobis, kus südame biopinge te niisuguse
liitmise tulemusena saadakse elektronkiiretoru ekraanil
südame seisundit iseloomustav kujund.

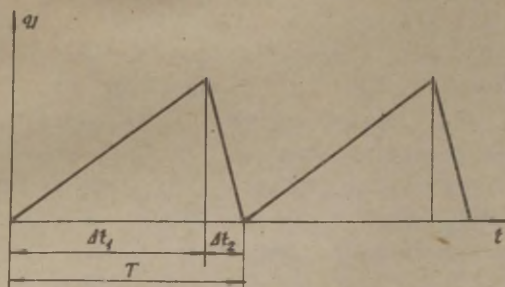
Eristatakse ostsillograafi kaht töörežiimi, mille valik
toimub lüliti K abil (joon. 1). Ühe režiimi korral antakse
kummalegi kallutusplaatide paarile väline signaal, ostsil-
logramm kujutab elektronkiire jälje nende signaalide mõjul
toimuvat liitliikumist. Teisel juhul jälgitakse ühe signaa-
li sõltuvust ajast. Vastavalt eelöeldule tuleb siis ühele
kallutusplaatide paarile (tavaliselt vertikaalsetele plaat-
tidele anda ajas lineaarselt muutuv pinge (joon.3). Et ek-
raanil tekiks perioodilise signaali graafiku püsiv kujutis,
on tarvis, et ühekordne ostsillogramm korduks vähemalt 10...
20 korda sekundis (nägemisistingu kestus on ca 0,1 s) ja
üksikud ostsillogrammid kattuksid täpselt. Selleks peab x-
plaatide lineaarne pingemuutus perioodiliselt korduma.



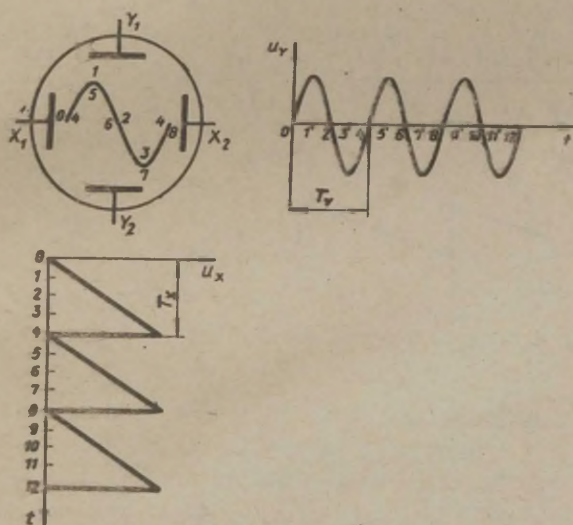
Joon. 4. Ostsillogrammi tekkimine, kui x-telje ja y-telje sihis muutub pinge ajas sinusoidaalselt. Pingete U_x ja U_y perioodid ja amplituudid on võrdsed, kuid faasid erinevad.



Joon. 5. Lissajous' kujundid.



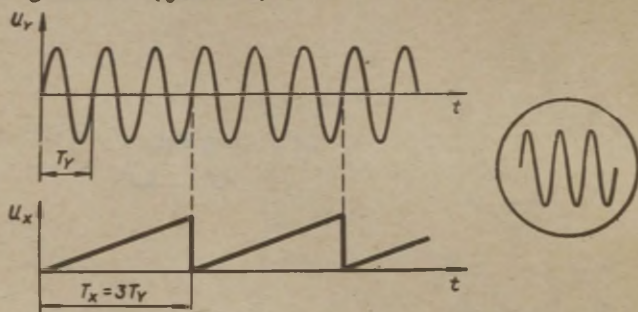
Joon. 6. Kallutuspinge ajaline sõltuvus.



Joon. 7. Ostsillogramm juhul, kui $T_x = T_y$.

Pinge peab teatud aja jooksul lineaarselt kasvama, siis järsu kaduma, uuesti kasvama jne. Sellist nn. hammaspinget (joon. 6) tekitab ostsillograafis sisemine kallutuspinge generaator (plokk 4, joon. 1). Hammaspinge mõjul liigub täpp ekraanil algul ühtlaselt vasakult paremale, siis "hüppab" kiiresti algasendisse tagasi. Joonisel 6 on tähistatud vastavad ajavahemikud Δt_1 ja Δt_2 . Peab olema täidetud tingimus $\Delta t_2 \ll \Delta t_1$ (ideaalne oleks $\Delta t_2 = 0$, see pole praktikas saavutatav). Tagasihüppe ajaks kiir kustutatakse.

Kui uuritava signaali periood T_y ja hammaspinge periood T_x on võrdsed, siis tekib ekraanil uuritava pinge ühe perioodi graafiku püsiv kujutis (joon. 7). Kui $T_x = n T_y$ (n on täisarv), siis saame ostsillogrammil uuritava pinge n perioodi graafiku (joon. 8).



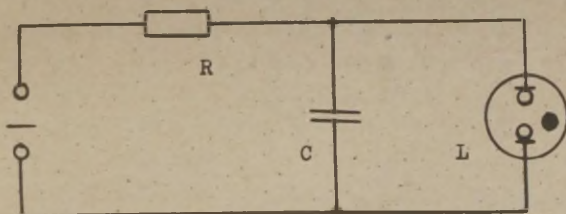
Joon. 8. Ostsillogramm juhul, kui $T_x = 3 T_y$.

4. Sünkroniseerimine. Kui tingimus $T_x = n T_y$ pole täpselt täidetud, hakkab pilt ekraanil liikuma x -telje sihis. Nii T_x kui T_y võivad juhuslike põhjuste tõttu muutuda, seepärast on liikumatu pildi saamiseks tarvis kasutada sünkroniseerimist (sama-ajastamist). Uuritava signaali võimendi (Y -võimendi) sidestatakse kallutusgeneraatoriga; hammaspinge generaatori sagedust muudetakse automaatselt nii, et hammaspinge perioodid algaksid alati uuritava pinge sama faasi juures. Sünkroniseerimiseks antava signaali tugevus on reguleeritav. Mõnikord kasutatakse sünkroniseerimi-

seks kas võrgusagedusega pinget või mingit välist signaali, mis antakse eriklemmi kaudu. Sünkronisatsioonisignaali allika valik toimub vastava ümberlülitite abil.

5. Lihtsaima hammaspinge generaatori põhimõtteline elektriline skeem (joon. 9) koosneb takistist R, kondensaatorist C ja gaastäitega lambist L.

Skeemi pingestamisel hakkab kondensaator C üle takisti R laaduma. Teooriast on teada, et pinge kondensaatoril muutub eksponentsiaalse seaduse järgi. Kui pinge kondensaatoril on jõudnud huumlambi süttimispingeni, tekib lambis L laviinitaoline lahendus ja kondensaator tühjeneb kiiresti. Skeemi parameetrite sobiva valikuga on võimalik saavutada olukorda, kus teatavas sagedusvahemikus eksponentsiaalkõvera lõigud on väga lähedased sirglõikudele (joon. 6). Samuti on parameetrite suuruse varieerimisega võimalik saada erineva sagedusega hammaspinget. C on tavaliselt muudetav astmeliselt, R aga pidevalt.



Joon. 9. Lihtsaim hammaspinge generaator.

6. Sisendsignaali võimendid on selleks, et vajaduse korral nõrka signaali enne kallutusplaatidele juhtimist võimendada. Liiga tugevaid signaale saab enne võimendisse juhtimist astmeliselt nõrgendada.

7. Toiteplokk on vajalik elektronkiiretoru ja kõikide lampide kütmiseks ja pingestamiseks. Ta koosneb alaldist lampide toiteks ja kõrgepingealaldist toru pingestamiseks.

Ostsillograafi põhiparameetrid

1. Tundlikkuseks nimetatakse helenduva täpi kõrvalekallet ekraanil vastavatele siseklemmidele rakendatud ühikulise pinge mõjul. Tundlikkus määratakse eraldi x - ja y -teljel; tavaliselt on see reguleeritav. Kui tundlikkuse γ määramiseks rakendatakse kallutusplaatidele sinusoidaalne pinge, siis arvutatakse γ valemist

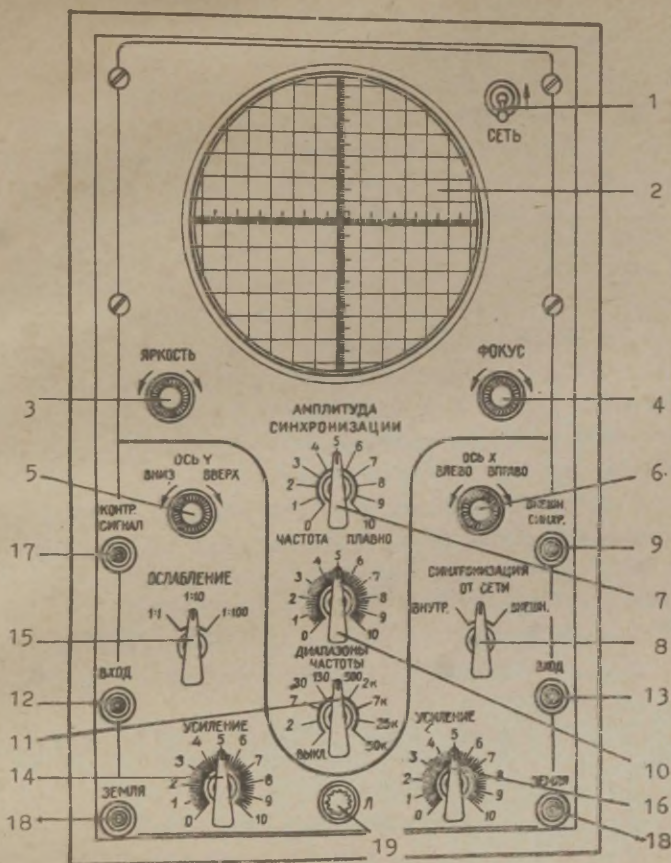
$$\gamma = \frac{L}{k \cdot 2 \sqrt{2} U} \quad (2)$$

kus L on helendava joone pikkus ekraanil, k - sisendpinge nõrgenemise koefitsient (k väärtus on 1, 0,1 või 0,01, olenevalt lüliti 15 asendist; vt. joon. 10), U - pinge efektiivväärtus (mõõdetakse voltmeetriga).

Tundlikkuse teadmine võimaldab kasutada ostsillograafi pinge mõõtmiseks.

2. Läbilaskeriba. Ostsillograafi tundlikkus sõltub sagedusest. See on sisendsignaali võimendi omadus. Sagedusvahemikku, mille ulatuses tundlikkus pole vähenenud rohkem kui $\sqrt{2}$ korda maksimaalsest tundlikkusest, nimetatakse läbilaskeribaks. Läbilaskeriba määratakse vastava sisendi sageduskarakteristikult, s.o. graafikult, mis näitab tundlikkuse sõltuvust sisendpinge sagedusest. Mõnedel ostsillograafidel on läbilaskeriba altpoolt piiramata, neid nimetatakse alalispinge ostsillograafideks.

3. Kallutusgeneraatorit iseloomustavad hammaspinge perioodi maksimaalne ja minimaalne väärtus.



Жоон. 10. Остсиллограафи С1-1 есипанеел.

Тöö käik

1. Остсиллограафи käsitsemine. Elektronostsillograаfi С1-1 detailid on monteeritud metallkastis asuvale šassiile ja juhtimisseadmed on välja toodud esiplaadile. Esiplaadil on järgmised lülitid ja regulaatorid (жоон. 10):

- 1) võrgulüliti;
- 2) elektronkiiretoru ekraan;
- 3) helendava täpi (kujutise) heleduse regulaator (muu-

dab pinget tüürival elektroodil);

- 4) kiire teravustaja;
- 5) kiire nihutaja y-teljel;
- 6) kiire nihutaja x-teljel;
- 7) sünkroniseeriva pinge amplituudi regulaator;
- 8) sünkroniseerivate pingeallikate ümberlülititi;
- 9) klemm välise sünkronisatsiooni ühendamiseks;
- 10) kallutuspinge sageduse pidev regulaator;
- 11) kallutuspinge generaatori sageduse astmeline lülititi 2 Hz kuni 50 Hz; kui lülititi on näiteks asendis 7, siis kallutuspinge pidev regulaator katab vahemiku 7 Hz kuni 30 Hz; asendis "ВНМ." (see vastab lülititi K ülemisele asendile plokkskeemil joon. 1) on kallutuspinge generaator välja lülitatud ja x-telje sisendklemmidele antav signaal antakse võimendi kaudu x-kallutusplaatidele;
- 12) y-telje sisendklemm uuritava pinge ühendamiseks;
- 13) x-telje sisendklemm uuritava pinge ühendamiseks;
- 14) y-telje võimendi võimenduse regulaator (tundlikkuse regulaator y-teljel);
- 15) y-telje võimendi sisendsignaali astmeline nõrgendi;
- 16) x-telje võimendi võimenduse regulaator (tundlikkuse regulaator x-teljel);
- 17) kontrollsignaali klemm (50 Hz, 2,5 V maandusklemmide suhtes;
- 18) maandusklemmid;
- 19) signaallamp.

Ostsillograafi tagaseinal on klemmlaud, mille klemmid on otseühenduses kallutusplaatidega. Normaalses tööolukorras on kallutusplaadid ühendatud võimendi väljunditega. Samal klemmlaual asuvad klemmid kiire heleduse moduleerimiseks (vajaduse korral). Normaalses tööolukorras on modulaator välja lülitatud, heledust tüüriv elektrood ühendatud heleduse regulaatoriga.

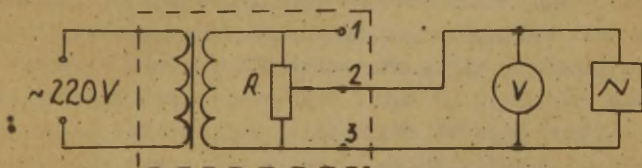
Tutvume kõigi juhtimisorganite paigutusega. Pöörame tundlikkuse regulaatorid nullasendisse (maksimaalselt vasakule). Ühendame ostsillograafi valgustusvoolu võrku ja lülitame võrgulülititi sisse. Süttib signaallamp; umbes

minuti möödudes peab ekraanil ilmuma helenduv täpp. Kui seda ei juhtu, suurendame kiire heledust. Kui ka see ei mõju, nihutame kiirt piki x- ja y-telge, kuni täpp asetub ekraani tsentrisse. Paigalseisva täpi heleduse reguleerime nüüd minimaalseks, muidu kõrbeb ekraani luminofoor. x-telje võimenduse suurendamisega (kallutuspinge generaator ei ole välja lülitatud!) tekitame ekraanil horisontaalse joone.

Alljärgnevalt loetletud tööülesannetest 2 - 6 võib juhendaja valikul mõned täitmata jätta.

2. Võrgupinge kuju jälgimiseks ühendame klemmi "КОНТРОЛЬНЫЙ СИГНАЛ" Y-sisendi ülemise klemmiga. Sagedusdiapsoonide astmelise lüliti (11) (joon. 10) paneme asendisse 30, sünkroniseerivate pingeallikate ümberlülititi 8 asendisse "Внутр," või "Синхронизация от сети", nupu "Ослабление" asendisse 1:10. Nupu "Усиление Y" (14) abil reguleerime kõvera amplituudi parajaks, nuppude "Частота плавно" (10) ja "АМПЛИТУДА синхронизации" (7) abil saame ekraanile paigalseisva kujutise. Muutes kallutuspinge generaatori sagedust astmelise lüliti (11) abil, püüame ekraanile saada ühe, kaks, kolm jne. siinusfunktsiooni täisperioodi.

3. Tundlikkuse määramine y-teljel. Ostsilloograafi tundlikkuse määramiseks kasutame trafost ja potentsiomeetrist koostatud stendi (joon. 11). Äärmised klemmid 1 ja 3 stendil on trafo väljundklemmid, milledega on paralleelselt



Joon. 11. Skeem tundlikkuse määramiseks.

ühendatud takisti R. Keskmise klemm 2 on ühendatud liugkontaktiga. Ostsilloograafi Y-sisendi peab ühendama klemmidega 1 ja 2 või 2 ja 3. Reguleerides liugkontakti asendit, võime muuta ostsilloograafi antavat sisendpinget 0-st kuni trafo

väljundpingeni. Sisendpinge väärtuse määrame voltmeetriga. Kallutuspinge generaatori lülitame välja.

Määrame tundlikkuse y -teljel võimenduse regulaatori nupu 14 (joon. 10) asendites 1...10. Sisendpinge astmeline nõrgendi peab olema asendis 1:100 (miks?). Anname sisendisse pinge U_y ja mõõdame vertikaalse helenduva joone pikkuse l_y ekraanil, kasutades ekraani ees olevat millimeetriskaalat. Andmed kanname tabelisse, kuhu on jäetud ruumi ka arvutustulemuste jaoks.

Tundlikkuse γ_y arvutame valemist (2). Suhteline piirviga $\frac{\Delta r_y}{r_y}$ on U_y ja l_y suhteliste piirvigade summa. Et l_y absoluutne viga ei olene joone pikkusest, siis on ilmselt kasulik valida joon võimalikult pikem. Elektronkiiretoru ekraani kumeruse tõttu on ekraani äärtel mõõtmisel võimalik suur parallaktiline viga. Seepärast reguleerime helenduva joone pikkuseks alati ligikaudu $2/3$ ekraani läbimõõdust. Selleks vajaliku sisendpinge mõõtmisel valime voltmeetri piirkonna nii, et U_y suhteline piirviga oleks minimaalne võimalik.

Piirvead $\frac{\Delta r_y}{r_y}$ ja Δr_y arvutame ainult tabeli kolme rea jaoks - alguses, lõpus ja keskel.

4. Y-telje võimendi sageduskarakteristika määramine.

Ühendame y -telje sisendklemmidega helisagedusliku vahelduvpinge generaatori (helisagedusgeneraatori) väljundpinge klemmid. Kui helisagedusgeneraatoril puudub väljundpinge mõõtmiseks voltmeeter, siis ühendame samadele klemmidele lampvoltmeetri, mille normaalsagedusvahemik sisaldab helisagedusi (20 Hz - 20 kHz). Reguleerime helisagedusgeneraatori väljundpinge väärtuse selliseks, et see langeks lampvoltmeetri mingi skaalapirkonna lõpuossa ja helenduva joone pikkus ostsillograafi ekraanil võimenduse regulaatori mingis (eelmises punktis gradueeritud) asendis oleks umbes $2/3$ ekraani läbimõõdust. Mõõdame joone pikkused ekraanil sisendpinge mitmesugustel sagedustel f (näiteks 20, 70, 200, 700, 2000, 7000 ja 20 000 Hz), hoides sisendpinge väärtuse konstantsena. Selleks tuleb helisagedusgeneraatori

väljundpinget sageduse igakordsel muutmisel järele reguleerida. Andmed kanname tabelisse.

Joonestame sisendkarakteristika graafiku teljestikus $\log f - y$. Milleks on antud juhul tarvilik kanda x -teljele $\log f$ (mitte f)? Märgime ka läbilaskeriba piirid, kui need jäävad uuritud sagedusvahemiku piiridesse.

5. Lissajous' kujundite jälgimiseks anname X -sisendisse pinget vastavalt joonisele 11, Y -sisendisse aga helisagedusgeneraatorist. Kallutuspinge lüliti (11) (joon. 10) asendisse "ВНЧЛ.". Ekraanil saame jälgida kujundeid, mis tekitavad kahe ristisihilise erineva sagedusega siinuselise võnkumise liitumise tulemusena. X -sisendisse antava pinget sagedus on 50 Hz, helisagedusgeneraatorist anname Y -sisendisse pinget sagedusega 50, 75, 100, 150 ja 200 Hz. Visandame saadud kujundid protokollis.

Lissajous' kujundite abil määratakse praktikas sageli uuritava signaali sagedust tuntud (reguleeritava) sagedusega võrdlemise teel.

6. Kallutuspinge generaatori gradueerimine. Tuleb leida nuppude (11) ja (10) (joon. 10) kindlatele asenditele vastavad kallutuspinge generaatori sagedused hertsides. Kallutuspinge generaatori sagedus on võrdne helisagedusgeneraatori sagedusega siis, kui ostsillograafi ekraanil on sinusoidi üks täisperiood.

Lülitame helisagedusgeneraatori Y -sisendile. Asetame lüliti "Диапазон частот" mingisse kindlasse asendisse. Nupu "Частота плавно" kõigi asendite jaoks püüame helisagedusgeneraatorist tuleva signaali sageduse muutmise teel saada ekraanil ühe sinusoidi. Vastavad sagedused registreerime. Katse ajal peab nupp (8) olema asendis "Внешн." (miks?). Andmed koondame tabelisse.

Protokolli vormistamisest

Protokolli algusesse joonestame ostsillograafi plokk skeemi, esitame plokkide nimetused koos nende otstarbe lühikirjeldusega. Esitame tundlikkuse ja selle piirvea

arvutusvalemid koos tähistete selgitusega.

Tööülesande 1 täitmist kajastame protokollis ostsillo-
graafi sisselülitamise ja täpi ekraani tsentrisse seadmi-
se protseduuri lühikirjeldusena. Kirjeldame, kuidas saab
ekraanil tekitada horisontaalse joone. Ülesande 2 täitmi-
sel joonestame (skitseerime) võrgupinge graafiku, mida
näeme ekraanil.

Edasi joonestame tundlikkuse määramisel kasutatava lü-
lituse skeemi (koos tähistuste selgitusega). Tundlikkuse
määramiseks vajalikud mõõtmis- ja arvutustulemused esitame
tabelis järgmise vormi järgi:

T a b e l 1

Y-võimendi nupu asend	$U_Y (V)$	$l_Y (mm)$	$\gamma_Y (\frac{mm}{V})$	$\Delta \gamma_Y (\frac{mm}{V})$	$\frac{\Delta \gamma_Y}{\gamma_Y}$

Y-võimendi sageduskarakteristika määramiseks vajalikud
mõõtmistulemused kanname tabelisse vormi 2 järgi. Ehitame
poollogaritmisel paberil sageduskarakteristika graafiku,
määrame läbilaskeriba.

Y-võimendi nupp asendis

Sisendpinge $U_Y = \dots V$

T a b e l 2

$f (Hz)$	$l_Y (mm)$	$\gamma_Y (\frac{mm}{V})$

Kui läbilaskeriba piirid ei jää kasutada olnud sagedusvahemikku, tuleb see tõsiasi kirjalikult protokollis esitada.

Edasi järgnevad Lissajous' kujundite skitsid. Igale kujundile märgime juurde sagedused f_x ja f_y . Esitame Lissajous' kujundite kasutamisel põhineva sageduse mõõtmise protseduuri lühikirjelduse.

Kallutuspinge generaatori gradueerimise andmed esitame tabelis vormi 3 järgi.

T a b e l 3

Kallutusgeneraatori sageduse astmelise
regulaatori nupp asendis ...

Kallutusgeneraatori sageduse pideva regulaatori nupu asend	Helisagedusgeneraatori sagedus (Hz)

Joonestame graafiku, kandes horisontaalteljele kallutuspinge pideva regulaatori nupu asendid, vertikaalteljele helisagedusgeneraatori vastavad sagedused, märkides juurde ka kallutuspinge generaatori sageduse astmelise lüliti asendi.

Lisaküsimusi:

1. Selgitage vahelduvvoolu iseloomustavaid suurusi: pinge (voolu) ajaline sõltuvus, pinge amplituud ja efektiivväärtus, sagedus, ringsagedus, periood, faas jt.

2. Kuidas saab helenduvat täppi ekraanil kustutada ostsillograafi välja lülitamata?

3. Kuidas tuleb pingestada elektronkiiretoru X-plaate ja Y-plaate, et täpp ekraanil nihkuks ülesse vasakule?

4. Mitu 50 Hz vahelduvpinge perioodi näeme ekraanil, kui hälvituspinge sagedus on 12,5 Hz?

5. Missuguse ostsillogrammi saame ekraanil, kui uuritava siinuselise vahelduvpinge sagedus ja hälvitussagedus suhtuvad nagu 1:2? Tekitage siisugune pilt.

6. Missugune Lissajous' kujund tekib, kui Y-pinge sagedus on 160 Hz, X-pinge sagedus 80 Hz ja faasinihe nende vahel π ?

7. Kuidas tuleb ühendada patsiendi elektroodid ostsillograafiga, et tekitada selle ekraanil kardiogramm?

8. Ekraanil on uuritava pinge 6 täisperioodi; mis tuleb teha, et perioode oleks vaid 2?

9. Miks valemis (3) on nimetajas kordajad 2 ja $\sqrt{2}$?

10. Ostsillograafi tundlikkus on 0,5 mm/mV. Kas see ostsillograaf sobib 20 μ V amplituudiga biopinge uurimiseks?

11. Konstrueerida joon. 4 eeskujul Lissajous' kujund juhu jaoks, kui mõlemale sisendile on antud sama sagedusega sinusoidaalne pinge, kusjuures ajamomendil $t = 0$ on mõlemas sisendis pinge null (siinused on samas faasis). Pingete amplituudväärtused võtta võrdsed.

Kirjandus

- I. Ливенцев Н.М. Курс физики, М., "Высшая школа", 1978, с. 169-172.

INDUKTIIVSUSE JA MAHTUVUSE MÄÄRAMINE VAHELDUVVOOLU AHELAS

Tööülesanne

Määrata pooli induktiivsus ja kondensaatori mahtuvus.

Töövahendid

Stend poolide ja kondensaatoritega, reostaat, ampermeter, voltmeetrid, hertsmeeter, juhtmed.

Teoreetiline sissejuhatus

Vahelduvvooluks nimetatakse ajas perioodiliselt suunda või suurust ja suunda muutvat voolu. Praktikas puutume kõige rohkem kokku siinuseliselt muutuva vahelduvvooluga, mida üldjuhul võib kirjeldada võrrandiga

$$i = I_0 \sin (\omega t + \varphi), \quad (1)$$

kus i on voolutugevuse hetkväärtus,

I_0 - voolutugevuse maksimaalväärtus,

ω - ringsagedus,

t - aeg,

$\omega t + \varphi$ - faas,

φ - faasinurk ajamomendil $t = 0$.

Sageli loetakse ahelas mõjuva vahelduva elektromotoorjõu algaas nulliks, siis tähendab φ voolutugevuse avaldises ühtlasi faasinurka elektromotoorjõu $e = E_0 \sin \omega t$ suhtes.

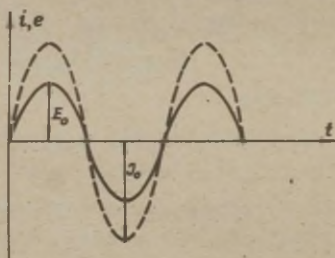
Iga siinuseliselt muutuv suurus on määratud, kui on tea-

da selle amplituud, ringsagedus ja algfaas. Kui aega hakata lugema momendist, mil $i = 0$, siis ka $\varphi = 0$ ja võrrand (1) saab kuju

$$i = I_0 \sin \omega t.$$

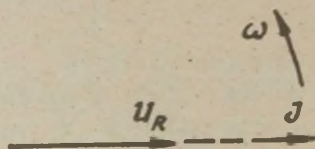
Vahelduvvoolu ahelais eristatakse kolme liiki takistusi e. koormusi: oomiline, induktiivne ja mahtuvuslik. Vahelduvvoolu teooriast tuleneb, et induktiivtakistus $X_L = \omega L$, mahtuvuslik takistus aga $X_C = 1/\omega C$.

Olgu meil vooluring, mis sisaldab ainult oomilist takistust. Sel juhul on ahelat läbiv vool samas faasis teda põhjustava elektromotoorjõuga. Graafiliselt on selline olukord kujutatud joonisel 1, kus pidev joon vastab elektromotoorjõule ja punktiirjoon voolutugevusele.



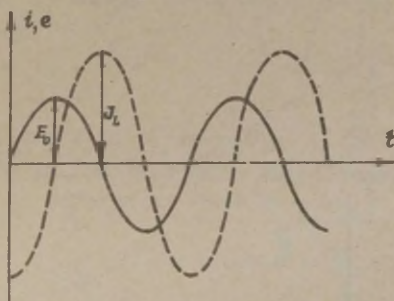
Joon. 1. Voolutugevus ja elektromotoorjõud ainult oomilist takistust sisaldava vooluahela puhul.

Vektordiagrammina kujutatakse vaadeldavat juhtu joonisel 2.

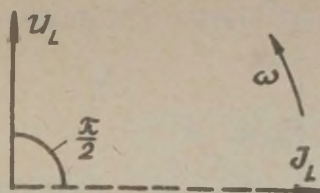


Joon. 2. Voolutugevuse ja pinge vektordiagramm oomilist takistust sisaldava vooluahela jaoks.

Vaatleme induktiivpooli sisaldavat vooluringi. Pooli läbiva voolu ja teda põhjustava elektromotoorjõu (või elektromotoorjõu allika klemmipinge) vahel tekib faasinihe, kusjuures voolutugevuse kasv jääb pinge kasvust nurga φ võrra maha (joon.3). Jättes arvestamata pooli oomilise takistuse, võib kirjutada: $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ (joon.4) .



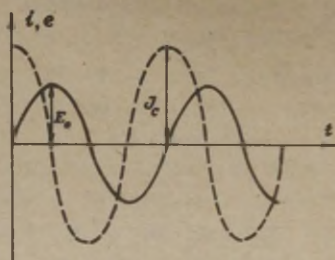
Joon. 3. Voolutugevus ja elektromotoorjõud pooli sisaldava vooluallika puhul.



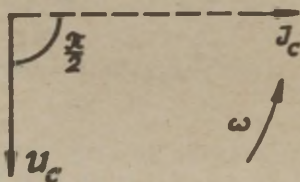
Joon. 4. Voolutugevuse ja pinge vektordiagramm pooli sisaldava vooluahela jaoks.

Kui vooluahel sisaldab kondensaatorit, toimub voolutugevuse kasv pinge kasvust kiiremini (joon. 5). Jättes arvestamata vooluahela oomilise takistuse, võib kirjutada $\varphi = +\frac{\pi}{2}$ (joon. 6).

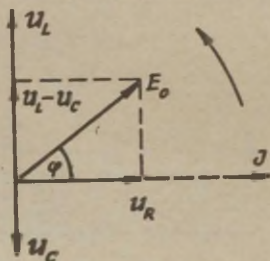
Olgu meil vooluring, mis sisaldab aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvuslikku takistust. Sellisel juhul on faasinurga φ ja voolutugevuse amplituudväärtuse I_0 leidmiseks sobiv kasutada pingete vektordiagrammi (joon. 7).



Joon. 5. Voolutugevus ja elektromotoorjõud kondensaatorit sisaldava vooluahela puhul.



Joon. 6. Voolutugevuse ja pingete vektordiagramm kondensaatorit sisaldava vooluahela jaoks.



Joon. 7. Pingete vektordiagramm.

Jooniselt 7 on näha, et

$$E_0^2 = U_R^2 + (U_L - U_c)^2 = I_0^2 R^2 + I_0^2 (X_L - X_c)^2,$$

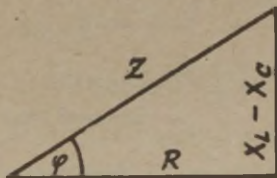
millest

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2}}. \quad (2)$$

$$\text{Suurust } Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (3)$$

nimetatakse kogu- või näivtakistuseks või impedantsiks.

Kui vähendada joonisel 7 kujutatud pingete kolmnurga külgede pikkusi I_0 korda, saadakse joonisel 8 kujutatud takistuste kolmnurk.



Joon. 8. Takistuste kolmnurk.

Jooniselt 8 võib leida faasinurga:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (4)$$

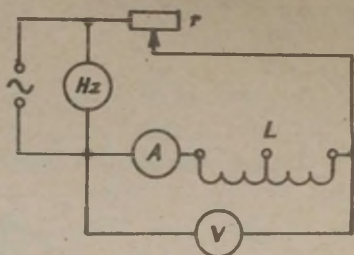
Töö käik

1. Pooli induktiivsuse määramiseks koostame vooluringi vastavalt skeemile (joon. 9).

Uurimisobjektiks on väljavõtetega induktiivpool. Enne skeemi pingestamist asetame reostaadi r liugkontakti nii, et takistus oleks maksimaalne. Hiljem suurendame voolutugevust ahelas reostaadi takistuse vähendamisega. Üheaegselt ampermeetri lugemiga registreerime ka voltmeetri näidu. Katse teeme kahe erineva induktiivsusega, mõlemal korral kolmel erineval voolutugevusel. Vahelduvvoolu sageduse ν mõõdame hertsmeetriga. Pooli oomilise takistuse mõõdame alalisvoolu mõõtesillaga või testriga pärast kõikide ülal- kirjeldatud mõõtmiste lõpetamist ja skeemi lahtivõtmist.

Induktiivsuse leiame valemist (tuletada!)

$$L = \frac{X_L}{2 \pi \nu} \quad (5)$$

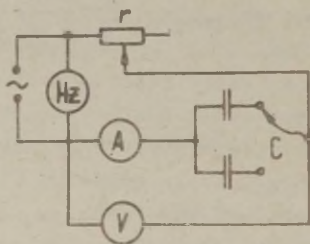


Joon. 9. Katseskeem pooli induktiivsuse määramiseks.

Faasinurga arvutamiseks kasutame valemit (4). Katseandmed ja tulemused koondame tabelisse.

Väljavõte	Jrk. nr.	I	U	ν	R_o	X_L	L	$tg\varphi$	φ
	1.								
	2.								
	3.								
	1.								
	2.								
	3.								

2. Kondensaatori mahtuvuse määramiseks koostame vooluringi vastavalt skeemile (joon. 10).



Joon. 10. Katseskeem kondensaatori mahtuvuse määramiseks.

Uurimisobjektiks on kondensaatorite patarei. Määrame analoogiliselt p. 1. voolutugevuse ja ping väärtused kahe erineva kondensaatori jaoks.

Mahtuvuse leiame valemist (tuletada!)

$$C = \frac{1}{2 R \omega X_C} . \quad (6)$$

Tulemused koondame tabelisse

Väljavõte	Jrk. nr.	I	U	ω	X_C	C
	1.					
	2.					
	3.					
	1.					
	2.					
	3.					

Lisaküsimusi

1. Mida nimetatakse vahelduvvoolu perioodiks?
2. Tuletada X_L ja X_C ühikud.
3. Mis on ping ja voolu amplituud- ja efektiivväärtused?
4. Defineerige induktiivsuse ja mahtuvuse ühikud.
5. Mis on oomiline takistus?
6. Miks ei kohusta tööjuhend faasinurga arvutamist mahtuvuse mõõtmisel?
7. Missugune on organismi kudede induktiivsus, mahtuvus?

Kirjandus

1. Keskkooliõpik.
2. Ремизов А.Н. Курс физики, электроники и кибернетики, М., "Высшая школа", 1982, с. 255-262.

TUTVUMINE INDUKTIIVSE ANDURIGA

Tööülesanne

Tutvuda mehaanilise nihke induktiivse anduri töötamise põhimõttega.

Töövahendid

Induktiivse anduri mudel mikromeetrilise seadeldisega, madalsageduslik signaalgeneraator, lampvoltmeeter.

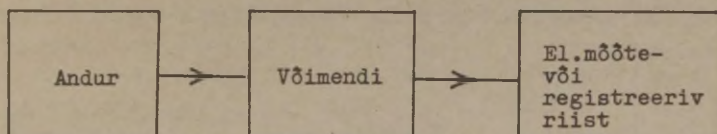
Sissejuhatus

Mitteelektriliste suuruste (temperatuuri, rõhu, mehaaniliste nihete jne.) mõõtmisel kasutatakse tihti elektrilisi ja elektroonilisi mõõte- ja registreerivaid riistu, sest neil on suur tundlikkus, väike inertts ja nende abil võib teha mõõtmisi kauge maa tagant. Mõõdetavad mitteelektrilised suurused muundatakse elektrilisteks andurite abil.

Üldiselt on andur seadeldis informatsiooni saamiseks, mis reageerib mõõdetava suuruse mõjutusele. Andur muundab primaarse signaali (mõõdetava suuruse) ülekandeks ja mõõtmiseks sobivaks sekundaarseks signaaliks, enamikel juhtumitel elektriliseks. Tihti jaotatakse andureid generaator- ja parameetrilisteks anduriteks. Generaatorandurid genereerivad mõõdetava signaali mõjul pinget või voolu (näiteks piezoelektrilised, termoelektrilised jt. andurid). Parameetrilistel anduritel mõõdetava signaali mõjul muutub mingi nende parameeter (oomiline takistus, elektrili-

ne mahtuvus, induktiivsus).

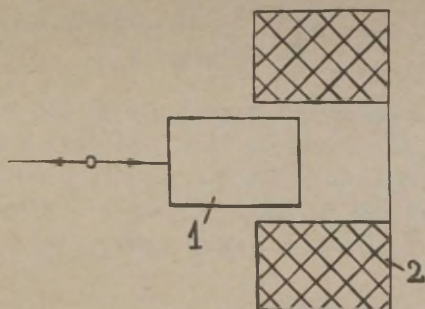
Kuna enamikel juhtudel anduri elektriline signaal on väga nõrk, siis seda tuleb võimendada. Niisuguse mõõtmise plokskeem on toodud joonisel 1.



Joon. 1. Mõõtmise plokskeem.

Mitmesugused andurid on laialt kasutusel ka bioloogilises ja meditsiinilises praktikas, mitmesuguste organismi ja selle organite seisundit iseloomustavate mitteelektriliste suuruste mõõtmisel.

Lihtsaim induktiivne andur koosneb liikumatust poolist ja selles nihutatavast ferromagnetilisest südamikust (joon. 2).



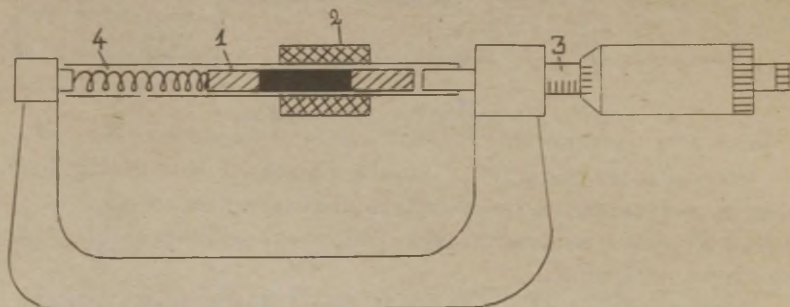
Joon. 2. Induktiivne andur.

1 - ferromagnetiline südamik, 2 - pool.

Südamik, mis on ühendatud uuritava objektiga, muuda nihkudes pooli induktiivsuse L . Muutub ka vahelduvvooluga toidetavasse mõõteskeemi lülitatud pooli induktiivtakistus $X_L = 2\pi fL$.

Töö käik

Vaadeldavas töös on kasutusel joonisel 3 kujutatud induktiivse anduri mudel. Südamiku nihke mõõtmiseks on see ühendatud mikromeetrilise seadeldisega, mis nihutab südamikku paremalt vasakule. Mikromeetri näidul 75 mm ulatub südamik maksimaalselt poolist välja, seda asendit loeme nullasendiks.

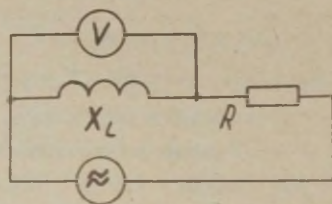


Joon. 3. Induktiivse anduri mudel.

1 - südamik, 2 - pool; 3 - mikromeetriline seadeldis,
4 - vedru.

Südamiku liikumine vasakult paremale toimub vedru abil.

Pool on ühendatud järjestikku takistiga R ja neid toidab konstantse pingega helisagedusgeneraator (joon. 4). Pingelangu poolil mõõdab voltmeeter (lampvoltmeeter). Pingepoolil sõltub pooli induktiivtakistusest.



Joon. 4. Katseskeem.

Töö teostamise järjekord.

1. Koostame lülitusskeemi vastavalt joonisele 4.

2. Pöörame mikromeetri 90 mm peale ja valime niisuguse generaatori pinge ning voltmeetri mõõtepiirkonna, et viimase näit oleks maksimaalne (üle terve skaala). Sageduse valime vahemikus 8000 ... 20 000 Hz.

3. Nihutame südamikku millimeetri haaval kuni jaotuseni 75, märkides iga mm järele voltmeetri pinge U_1 .

4. Kordame sama, liikudes tagasi paremale (kuni jaotuseni 90), märkides üles pinge U_2 .

5. Mõõteandmed paigutame tabelisse.

s (mm)	U_1 (V)	U_2 (V)	$U_{\text{keskm.}}$ (V)
1			
2			
.			
.			
15			

Olenevalt kasutatud voltmeetri piirkonnast võib pinget mõõta ka mV-des.

6. Saadud andmete põhjal joonestame graafiku $U_{\text{keskm.}} = f(s)$.

7. Analüüsime tulemusi.

Lisaküsimusi

1. Kas töös kasutatava anduriga on võimalik mõõta rõhku?

2. Pakkuge mahtuvusliku anduri variant mehaaniliste nihete mõõtmiseks.

3. Miks induktiivse anduri südamik peab olema ferromagnetilisest materjalist?

4. Kas induktiivse anduri vooluringi võib toita alalisvooluga?

5. Missuguseid mittelektrilisi suurusi mõõdetakse kõige sagedamini meditsiinilises praktikas?

6. Missugustest suurustest sõltub pooli induktiivsus?

7. Kuidas muutub pooli induktiivtakistus, kui suureneb vahelduvvoolu sagedus?

Kirjandus

1. Ливенцев Н.М. Курс физики. /Атомная и ядерная физика, основы медицинской электроники и основы медицинской кибернетики./ М., "Высшая школа", 1978, с.140-145.
2. Ремизов А.Н. Курс физики, электроники и кибернетики для медицинских институтов. М., "Высшая школа", 1982, с. 460-465.

VAHELDUVVOOLU ALALDAMINE

Tööülesanne

Tutvumine pooljuhtdiodi omadustega. Tähtsamate alaldi-
skeemide koostamine. Pulseeriva alalispinge ja voolu silu-
mine.

Töövahendid

Stendid transformaatori, diodide, drosseli ja kondensaa-
toritega. Koormistakistid, voltmeetrid, ostsillograaf, ühen-
dusjuhtmed.

Teoreetiline sissejuhatus

Pooljuhtdiodi ehituse ja tööpõhimõtte mõistmiseks on
eelnevalt vaja omandada järgmised mõisted: pooljuht, doo-
nor- ja aktseptorlisandid, omajuhtivus, lisandjuhtivus, põ-
hilised ja mittepõhilised laengukandjad, n-pooljuht, p-pool-
juht, elektriväli, potentsiaal ja pinge (vt. [1], [2]).

1. n- ja p-juhtivus

n-juhtivusega kristalli näiteks võib olla neljavalentne
Ge, kuhu on lisatud viievalentset Sb või As (doonorlisand).
Doonori aatomil läheb keemilise sideme loomiseks Ge aatomi-
tega vaja ainult nelja elektroni, seega iga lisandiaatomi
kohta jääb üks elektron vabaks, mis kristallile rakendatud
pinge korral liigub elektrivälja suunale vastupidises suu-
nas, s.t. väiksema potentsiaaliga välja punktist suurema
potentsiaaliga välja punkti suunas. n-pooljuhtis on põhilis-

teks laengukandjateks elektronid. Doonori aatom, andnud ära elektroni, jääb kristalli positiivselt laetud ioonina.

p-juhtivusega kristallina kasutatakse tihti neljavalentset Ge, kuhu on lisatud kolmevalentset In või Al. In või Al aatomil puudub üks elektron keemilise sideme loomiseks teda kristallis ümbritseva nelja Ge aatomiga. Puuduv elektron haaratakse mõnelt naabruses asuvalt Ge aatomilt, kuhu jääb elektroni puudujääk e. auk, mis on samaväärne positiivse laengukandjaga. Tekkinud auk Ge aatomi keemilises sidemes võib täituda elektroniga mõnelt teiselt Ge aatomilt, jne. p-tüüpi pooljuhtides on põhilisteks laengukandjateks augud, mis kristalli pingestamisel liiguvad elektrivälja suunas, s.t. suurema potentsiaaliga välja punktist väiksema potentsiaaliga välja punkti suunas. Elektroni haaranud lisandi aatomid esinevad p-tüüpi kristallis negatiivsete ioonidena.

Mittepõhilisteks laengukandjateks n-juhtivusega kristallis on augud ja p-juhtivusega kristallis elektronid. Neid on aga vastavate kristallide põhiliste laengukandjate arvuga võrreldes tunduvalt vähem.

2. Pingestamata p-n siire

Viime omavahel kontakti n- ja p-tüüpi pooljuhi. Kontaktpinna lähedast ala paksusega ca $1 \dots 0,1 \mu\text{m}$ nimetatakse p-n siirdeks.

Puudugu väline pinge p-n siirdel. Laengukandjad kummaski pooljuhis osalevad korrapäratus soojusliikumises. Selle tagajärjel toimub nende difusioon ühest pooljuhist teise. Teame, et difusiooni korral (vt. näiteks difusioon gaasides ja vedelikes) liiguvad osakesed piirkonnast, kus nende kontsentratsioon on suurem, piirkonda, kus nende kontsentratsioon on väiksem. Niisiis, n-tüüpi pooljuhist difundeeruvad p-tüüpi pooljuhti elektronid ja p-tüüpi kristallist difundeeruvad n-tüüpi kristalli augud.

Difusiooni tagajärjel tekivad kummaski pooljuhis kokku puutepinna lähedal erimärgilised ruumilaengud, n-piirkonnas tekib positiivne ruumilaeng, mis moodustub positiivselt laetud doonori aatomitest ning siia piirkonda difundeerunud

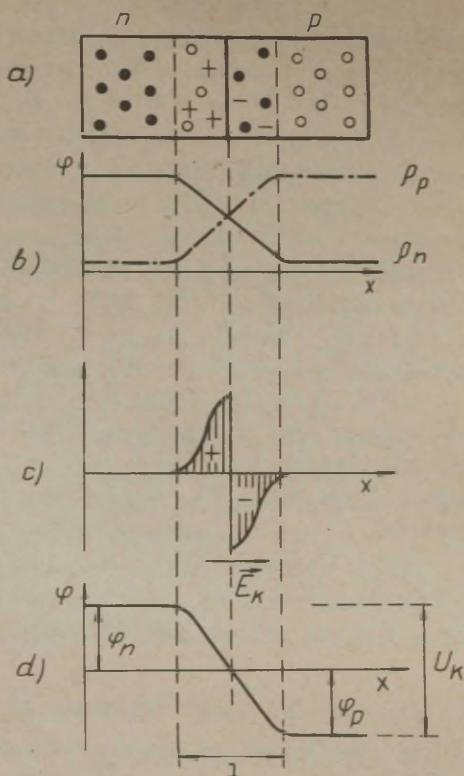
aukudest. p-piirkonnas tekib aga negatiivne ruumilaeng, mis moodustub negatiivselt laetud aktseptori aatomitest ning n-piirkonnast siia difundeerunud elektronidest (vt. joon. 1).

Difusiooni tagajärjel moodustunud ruumilaengud tekitavad kontaktpotentsiaalide erinevuse $U_k = \varphi_n - \varphi_p$ ja elektrivälja \vec{E}_k , mis on suunatud n-pooljuhist p-pooljuhti. p-n siirdel moodustub potentsiaalibarjäär, mis takistab põhiliste laengukandjate edasist difusiooni. Näiteks elektronid ei saa enam difundeeruda n-pooljuhist p-pooljuhti, sest elektrivälja potentsiaal on seal väiksem. Analoogiliselt on seletatav ka aukude difusiooni katkemine.

Eri tüüpi pooljuhtide kokkupuutepinna lähedaste ruumilaengute elektriväli tõukab põhilisi laengukandjaid siirdest eemale. Selle tagajärjel on p-n siirde keskmises osas elektronide ja aukude kontsentratsioon väiksem kui siirdest kaugemates n- ja p-piirkondades (vt. joon. 1 b). Vabade laengukandjate kontsentratsioonid p-n siirde keskosas ja sellest kaugemal võivad erineda suurusjärgult 10^4 korda. Järelikult on p-n siirde keskmise kihi elektrijuhtivus palju väiksem kui p ja n kristalli ülejäänud osadel. Seda keskmist, suure takistusega kihti nimetatakse tõkkekihiks.

3. p-n siirde pingestamine (joon. 2, joon. 3)

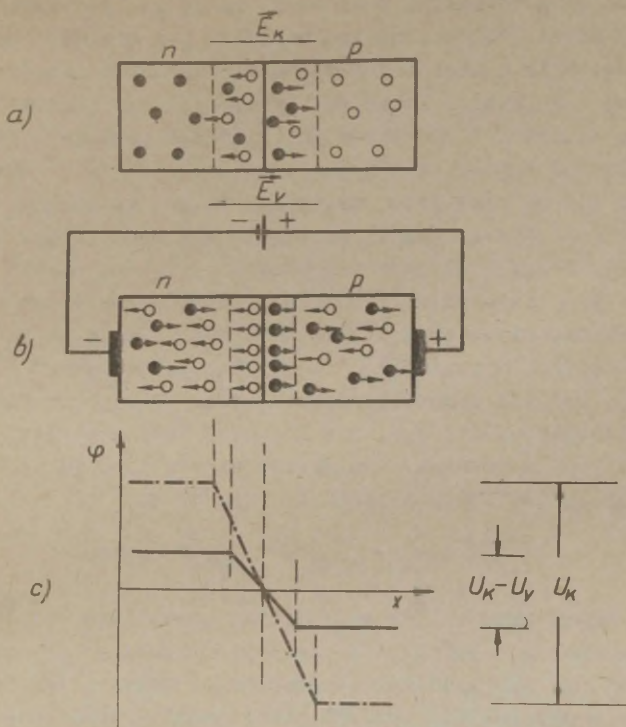
Rakendame p-n siirdele päripinge U_v , s.t. ühendame väliste pingeallika positiivse pooluse p-pooljuhiga ja negatiivse pooluse n-pooljuhiga. Päripinge poolt tekitatud elektriväli \vec{E}_v on kontaktpotentsiaalide erinevusest tingitud elektriväljaga \vec{E}_k võrreldes vastupidise suunaga. Summaarne väli muutub nõrgemaks ja potentsiaalide erinevus siirdel väheneb, s.t. väheneb ka potentsiaalbarjääri kõrgus ja suureneb laengukandjate difusioonist põhjustatud vool. Kui jätta arvestamata pingelang n- ja p-piirkonna takistusel, siis võib pinge siirdel U lugeda ligikaudu võrdseks $U = U_k - U_v$. Päripidisel pingestamisel mitte ainult ei vähene potentsiaalbarjääri kõrgus, vaid väheneb ka tõkkekihi paksus ning takistus. Kuna potentsiaalbarjääri kõrgus p-n siirdel on mõni kümnendik volti, siis sama suurusjärku päripidisest



Joon. 1. Füüsilised protsessid p-n siirdel.

- Kontakti viidud n- ja p-pooljuht. ● - elektron; + - ioniseeritud doonor; - - ioniseeritud aktseptor; ○ - auk.
- Põhiliste (vabade) laengukandjate tihedus. ρ_p - aukude tihedus; ρ_n - elektronide tihedus.
- Difusiooni tagajärjel tekkinud ruumilaeng σ .
- Potentsiaali muutus p-n siirdel. ϕ_n - potentsiaal n-pooljuhis; ϕ_p - potentsiaal p-pooljuhis; U_k - kontakt-potentsiaalide vahe.

\vec{E}_k - väljatugevuse vektor; $l = 1 \dots 0,1 \mu\text{m}$; $U_k = \text{ca } 250 \text{ mV}$.



Joon. 2. Füüsikalised protsessid p-n siirde päripidisel pingestamisel.

- a) pingestamata p-n siire (\vec{E}_k - ruumlaengute poolt tekitatud elektrivälja vektor); b) päripidi pingestatud p-n siire (\vec{E}_v - välise pingesallika poolt tekitatud elektrivälja vektor); c) potentsiaali muutus päripidi pingestamisel: — . — enne pingestamist; — — — pärast pingestamist.

pingest piisab, et märgatavalt vähendada potentsiaalbarjääri kõrgust ning tõkkekihi takistust. On selge, et teatud päripinge korral võib potentsiaalbarjääri p-n siirdel hoopiski kaotada. Siis muutub tõkkekihi takistus nulli lähedaseks ja p- ning n-kristalli läbib nn. otsevool, mis koosneb elektronide suunatud liikumisest positiivsele poolusele ja aukude suunatud liikumisest negatiivsele poolusele. Otsevoolu suurus oleneb rakendatud välispingest ja vooluringi takistusest (p- ja n-kristalli takistus ning vooluallika sisetakistus). Märgime, et ühendusjuhtmetes liiguvad ainult elektronid. Nad liiguvad vooluallika miinuspooluselt n-piirkonda ja kompenseerivad seal elektronide kao, mis tekib nende difundeerumisel p-piirkonda. p-piirkonnast liiguvad elektronid vooluallika positiivsele poolusele ja p-pooljuhis tekitavad pidevalt uued augud, mis liiguvad läbi p-n siirde negatiivse pooluse suunas. Summaarne otsevool on juhtme mistahes ristlõikes antud pingel U_V muutumatu.

$$I = I_{\text{elektronid}} + I_{\text{augud}} = \text{const.} \quad (1)$$

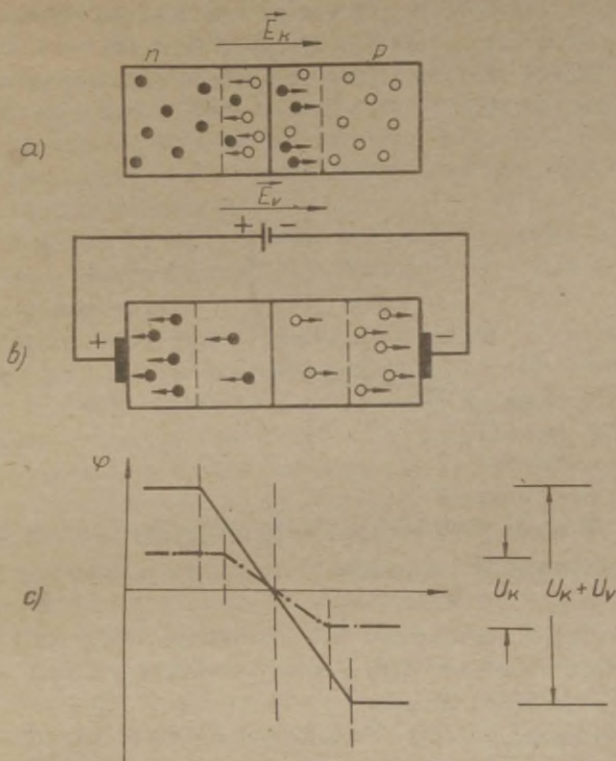
Ühendame nüüd välise vooluallika positiivse pooluse n-pooljuhiga ja negatiivse pooluse p-pooljuhiga (vt. joon.3). Sellel, nn. vastupidisel pingestamisel tekkiv elektriväli \vec{E}_V on samasuunaline kontaktpotentsiaalide erinevusest tingitud elektriväljaga \vec{E}_K . Summaarne väli tugevneb ning potentsiaalbarjääri kõrgus U suureneb.

$$U = U_K + U_V. \quad (2)$$

Põhiliste laengukandjate difusioon läbi p-n siirde lakkab. Tugevnenud elektrivälil surub vabu laengukandjaid p-n siirdest veelgi rohkem eemale - elektrone n-piirkonda ja auke p-piirkonda. Tõkkekihi paksus ja takistus suurenevad, p-n siiret läbib ainult väga nõrk vastuool, mis on tingitud mittepõhiliste laengukandjate liikumisest läbi siirde.

4. Pooljuhtdiod

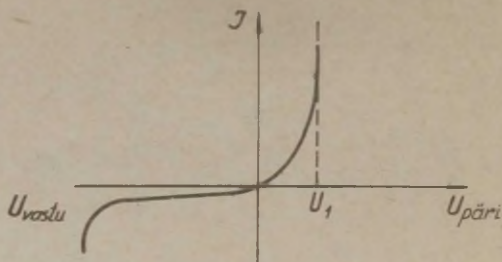
Pooljuhtdiodi põhiosaks on pooljuhtkristall, milles on tekitatud p-n siire. Kristalli otstele on kinnitatud mitte-



Joon. 3. Füüsikalised protsessid p-n siirde vastupidisel pingestamisel.

a) pingestamata p-n siire; b) vastupidi pingestatud p-n siire; c) potentsiaali muutus vastupidi pingestamisel;
 — . — — — enne pingestamist; — — — pärast pingestamist.

alaldavad metallist väljaviigi kontaktid. Tänu p-n siirdele on sellise struktuuri juhtivus päripidise pinge puhul $10^3 \dots 10^5$ korda suurem kui vastupingel. Joonisel 4 on esitatud diodi läbiva voolu sõltuvus rakendatud pingest, nn. volt-amperekarakteristik.



Joon. 4. Pooljuhtdiodi voltamperekarakteristik.

Pooljuhtdiodi kasutamisel alaldajana on oluline silmas pidades järgmisi parameetreid:

1. Lubatud vastupinge. Kui vastupinge ületab maksimaalse lubatud väärtuse, siis kasvab vastuvool järsult, toimub läbilöökk ja diod rikneb.

2. Lubatud päriool. Nagu nähtub voltamperekarakteristikult, langeb ka päripinge puhul osa pingest (U_1) diodile, mistõttu diodis eraldub teatud võimsus - diod kuumeneb. Temperatuuri tõusuga kasvab aga mittepõhiliste laengukandjate arv, suureneb vastuvool ja väheneb lubatud vastupinge. Kui soojuse äravool ei ole piisav, tekib läbilöökk.

5. Vahelduvvoolu alaldamine

Sobiva alalispinge saamise üheks sagedamini kasutatavaks meetodiks on vastava pingeni transformeeritud vahelduvvoolu alaldamine. Alaldiks võib olla mistahes tugevalt asümmeetrilise voltampere-tunnusjoonega suunaja, s.t. sagedeldis, mille juhtivus ühes suunas on palju suurem kui vastupidises (joon. 4) suunas.

Voolu alaldamiseks kasutatakse tavaliselt vaakumsuuna-

jaid (kenotrone), gaaslahendussuunajaid (gasotrone) ning pooljuhtsuunajaid (seleenalaldit, germaanium- ja ränidiodoode). Joonisel 5 on näidatud pooljuht-, vaakum- ja gaaslahendussuunaja tähistus skeemidel. Nende ehitusega tuleb tutvuda juhendi lõpus viidatud kirjanduse abil.

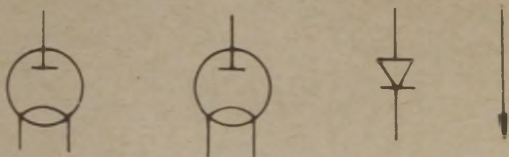
Käesolevas töös uurime vahelduvvoolu alaldamist pooljuhtsuunajate abil. Kasutatavamad alaldite lülitusskeemid on toodud joonisel 6.

Joonisel 6a on kujutatud poolperioodalaldi, joonisel 6b ja 6c - täisperioodalaldid. Lülitust 6c nimetatakse sage- li sildskeemiks.

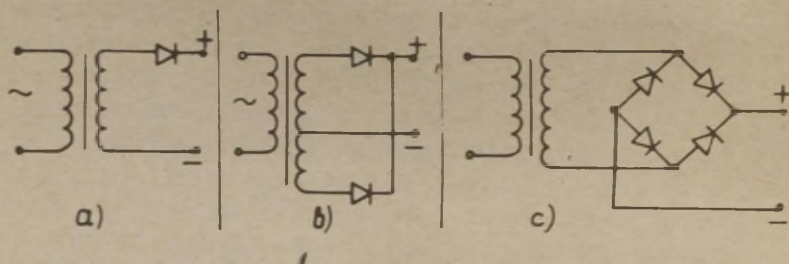
Alaldite väljundil saadav alalispinge on pulseeriv. Näiteks joonisel 7a kujutatud poolperioodalaldi koormustakistit R_k läbib pulseeriv vool ja pinge U_2 selle klemmidel on samuti pulseeriv (joon. 7b). Et aga paljudel juhtudel pingepulsatsioon ei ole lubatud, siis kasutatakse silumisfiltreid. Lihtsaimaks filtriiks on koormustakistiga R_k paralleelselt lülitatud kondensaator C (joon. 8a). Niisugune kondensaator vähendab pulsatsiooni, kuid pinge U_2 koormustakistil jääb ikka laineliseks (joon. 8b).

Nagu nähtub joonisest 8b, läbib vool dioodi vaid siis, kui pinge transformaatoril U_1 ületab väljundklemmidel (koormustakistil R_k) oleva pinge U_2 , s.o. ajavahemikel $(t_2 - t_1)$ ja $(t_4 - t_3)$. Diodis (suunajas) tekib siis pingelang ΔU . Kui vool läbib dioodi, siis kondensaator laadub. Ajavahemikul $(t_3 - t_2)$ (kui dioodist voolu läbi ei lähe) toimub kondensaatori tühjenemine, mille kiirus sõltub koormustakistit R_k läbiva voolu tugevusest. Väikeste voolutugevuste puhul ning väikese suunaja sisetakistuse puhul (rän- ja germaaniumdiodid) on pingelang ΔU väga väike, mistõttu teda võib arvestamata jätta. Võib juhtuda, et väikese voolutugevuse puhul, s.t. kui kondensaator ajavahemikus $(t_3 - t_2)$ tühjeneb vähe, võib keskmine alalispinge U_{2keskm} (mõõdab voltmeeter) olla isegi suurem vahelduypinge U_1 efektiivväärtusest - $U_{1efektiiv}$ (mõõdab vahelduvvoolu voltmeeter).

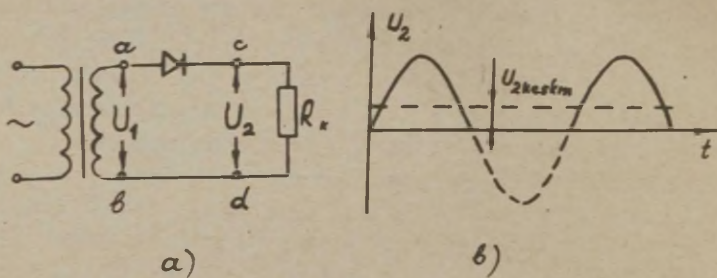
Täisperioodalaldi puhul on, võrreldes poolperioodalaldiga (ühesuguse koormusvoolu ja ühesuguse mahtuvusega kondensaatori korral), lainesus väiksem, sest kondensaatori



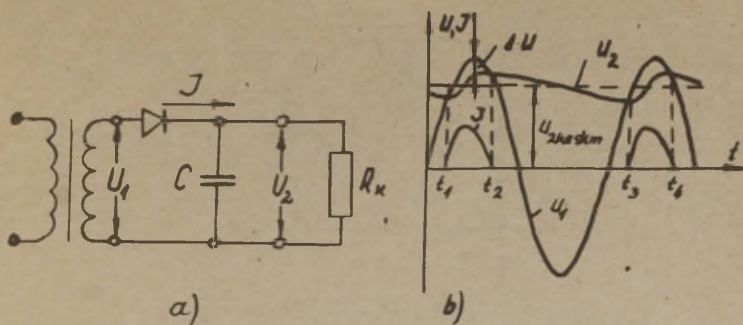
Joon. 5. Alaldavate elementide skeemitähised.



Joon. 6. Alaldite skeemid.



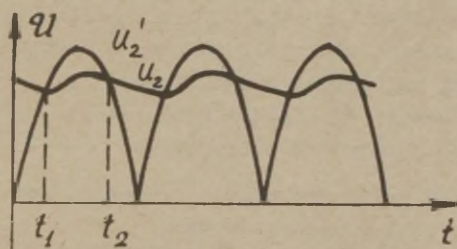
Joon. 7. Pulseeriva pingse saamine poolperioodalaldiga. Punktide a ja b vahele ühendatud voltmeeter näitab pingse U_1 efektiivväärtust, punktide c ja d vahel näitab voltmeeter pingse U_2 keskvaartust U_{2keskm} .



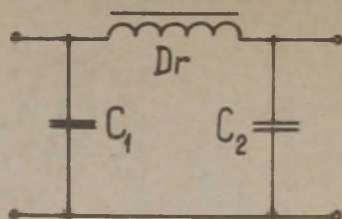
Joon. 8. Kondensaatori mõju poolperioodalaldi väljundpinge pulsatsioonile. I on diodi läbiva voolu tugevus.

laadimine toimub täisperioodalaldis ka teise poolperioodi ajal (joon. 9).

Lainesuse vähendamiseks kasutatakse silumisfiltreid, nendest kõige sagedamini Π -filtrit (joon. 10), mis koosneb kahest kondensaatorist C_1 ja C_2 ning drosselist D_r (suure induktiivsusega pool). Drosselil on suur induktiivtakistus vahelduvvoolule. Seetõttu drosselit läbiva voolu tugevuse muutused, mis on vaadeldavad vahelduvvooluna, temast läbi ei pääse. Õigesti valitud Π -filter annab praktiliselt lainesusetu alalispinge.



Joon. 9. Kondensaatori mõju täisperioodalaldi (vt. joon. 6 b, c) väljundpinge pulsatsioonile. U_2' on väljundpinge, kui alaldi skeemis puudub kondensaator. U_2 on kondensaatoriga silutud väljundpinge.



Joon. 10. Π - filter.

Töö käik

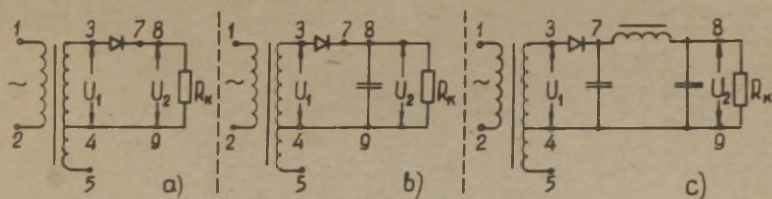
1. Käesolevas töös kasutatakse germaaniumdioode $\Pi 7\text{M}$. Koostame poolperioodalaldi skeemi ilma filtrita (joon. 11a). SKEEMIDE KOOSTAMISEL PEAME RANGELT SILMAS, ET JOONISTEL NÄIDATUD GERMAANIUMDIOODIDE ASEND (\neg) ÜHTIKS NENDELE PEALE MÄRGITUGA. SKEEMI VÕIB VOOLUVÕRKU ÜHENDADA ALLES PÄRAST SELLE KONTROLLIMIST ÕPPEJÕU POOLT! Mõõdame vahelduvpinge U_1 (punktide 3 ja 4 vahel) ja pulseeriva pinge U_2 (punktide 8 ja 9 vahel). Ühendades samade punktidega ostsillograafi^{*}, fikseerime pingekõvera kuju. Selleks paigutame ostsillograafi ekraanile läbipaistva paberi. Pingekõvera kuju joonistame ostsillograafi ekraani rikkumise ärahoidmiseks ettevaatlikult ning pehme pliiatsiga.

Koostame skeemi vastavalt joonisele 11b. Mõõdame pinged U_1 ja U_2 ning kalkeerime pingekõvera.

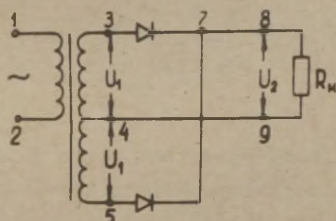
Lisame skeemile Π -filtri (joon. 11c), mõõdame pinged U_1 ja U_2 ning joonistame pingekõvera.

2. Koostame täisperioodalaldi skeemi (joon. 12) ja tee me sama, mis poolperioodalaldiga.

* Erinevate lülitusskeemide uurimisel jätta ostsillograafi y-telje võimendus muutumatuks.

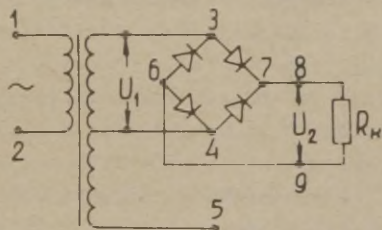


Joon. 11. Poolperioodalaldite skeemid.



Joon. 12. Täisperioodalaldi skeem.

3. Koostame täisperioodalaldi sildskeemi (joon. 13) ning kordame eelkirjeldatud mõõtmisi.



Joon. 13. Sildskeem.

Mõõtmistulemused paigutame järgmisse tabelisse.

Alaldi tüüp	Filter	Efektiiv- väärtus U_1	Amplituud- väärtus $U_m = U_1\sqrt{2}$	Kesk- väärtus U_2
Poolperiood- alaldi	ilma filtrita kondensaatoriga Π -filtriga			
Täisperiood- alaldi	ilma filtrita kondensaatoriga Π -filtriga			
Sildskeem- alaldi	ilma filtrita kondensaatoriga Π -filtriga			

Protokollile lisame ülesjoonistatud pingekõverad. Tulemuste analüüsi põhjal võrdleme uuritud skeeme.

Lisaküsimusi

1. Selgitage füüsikalisi protsesse p-n siirdel.
2. Millisesse süsteemi kuuluva riistaga võib mõõta nii alalis- kui vahelduvpinget?
3. Millise voltmeetriga tuleb antud töös mõõta pulseerivat pinget?
4. Kas võib pinge U_2 ületada pinget U_1 : a) koormatud alaldi puhul, b) lahtiühendatud koormustakistuse puhul?
5. Millisel juhul annab lihtne kondensaatorfilter peaaegu täielikult silutud pinge?
6. Defineerige vahelduvvoolu efektiivväärtused.
7. Defineerige pulseeriva voolu ja pinge keskvaartused.
8. Kuidas seletada kondensaatori ja drosseli siluvat toimet filtrites?
9. Defineerige mahtuvuse ja induktiivsuse ühikud.
10. Kuidas oleneb filtri siluv toime koormustakisti suurusest?

Kirjandus

1. Keskkooliõpik.
2. Ливенцев Н.М. Курс физики для медвузов. М., "Высшая школа", 1978, с. 175-178,

TRANSISTORI STAATILISTE KARAKTERISTIKUTE MÄÄRAMINE

Töö eesmärk

Tutvuda transistori ehituse ja tööpõhimõttega. Määrata transistori staatilised karakteristikud ühise emitteriga lülituses ja õppida tundma nende seost transistori põhi- parameetritega.

Töövahendid

Stend transistoriga, toiteallikas, milliampermeeter, mikroampermeeter, voltmeeter, millivoltmeeter.

Teoreetiline sissejuhatus

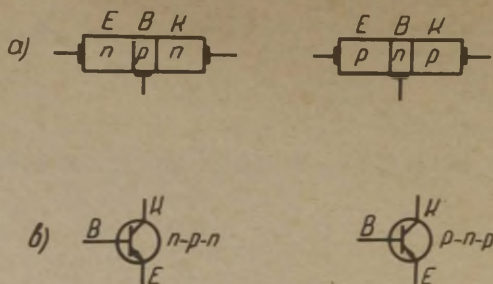
1. Enne kui asuda transistori tööpõhimõtte uurimisele, peab tutvuma füüsikaliste protsessidega p-n siirdel (vt. töö nr. 4).

Transistor on elektriliste signaalide võimendamiseks või genereerimiseks kasutatav elektronseade, mis põhineb laengukandjate kontsentratsiooni ja liikumise tüürimisel.

Transistor on üheks põhiliseks elemendiks kaasaegses elektroonikas. Ka nn. mikro- e. integraalskeemide aluseks on ühte kristalli tekitatud ja omavahel sobival kujul ühendatud transistorid.

Transistori võib vaadelda koosnevana kahest järjestikku lülitatud p-n siirdest.

Kahe p-n siirde kokkuühendamiseks on kaks võimalust. Neile võimalustele vastavalt saame n-p-n või p-n-p tüüpi



Joon. 1.

- a) n- ja p-juhtivusega pooljuhtide paiknemine n-p-n ja p-n-p transistoris.
- b) Transistorite skeemitähised: E - emitter; B - baas; K - kollektor.

transistori (vt. joon. 1). Transistori keskmist piirkonda nimetatakse baasiks. Baasiga külgnevad emitter ja kollektor. Nende nimetuste sisuline tähendus selgub transistori tööpõhimõtte uurimisel.

Emitteri- ja baasivahelist p-n siiret nimetatakse emittersiirdeks, baasi- ja kollektorivahelist p-n siiret aga kollektorsiirdeks. Transistor kui selline töötab ainult siis, kui emitter- ja kollektorsiirde-vaheline kaugus on väga väike (mõned μm). Seepärast tehakse transistorite tootmisel baasi kiht väga õhuke, võrreldes emitteri- ja kollektorikihtidega. Peale selle on tavaliselt lisandite kontsentratsioon, seega ka põhiliste laengukandjate kontsentratsioon, baasis märgatavalt väiksem kui emitteris ja kollektoris.

Transistorite skeemitähistel (joon. 1b) tähistab nool alati emitterväljaviiki. Noole suund aga näitab kokkuleppelist voolu suunda emitterväljaviigis (s.o. "+" \rightarrow "-"). Võib ka meeles pidada, et nool on alati suunatud n-pooljuhi poole.

Analüüsime n-p-n transistori töötamise põhimõtet nn. aktiivses staatilises režiimis. Sellisel juhul on transisto-

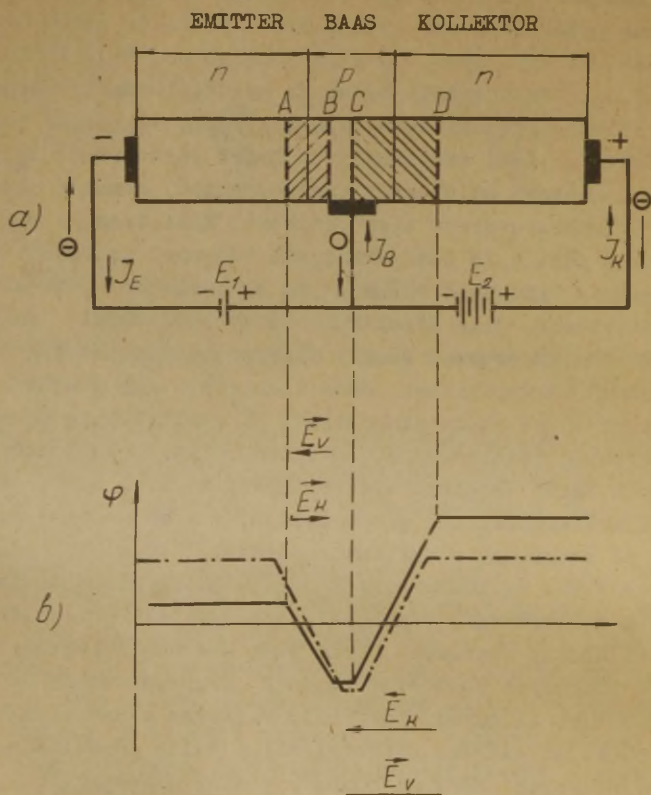
riga ühendatud ainult alalis-toitepinge allikad E_1 ja E_2 ning selliselt, et emittersiirdele rakendatakse päripidine pinge, kollektorsiirdele aga vastupidine pinge (vt. joon. 2). Meenutame nüüd protsesse p-n siirde päri- ja vastupidisel pingestamisel (vt. joon. 1, 2 ja 3 tööst nr. 4). Päripidise pinge U_{BE} rakendamisel baasi ja emitteri vahel vähenevad emittersiirdele potentsiaalbarjääri kõrgus, tõkkekihi paksus ning takistus. Läbi emittersiirde läheb emittervool I_E , mis peamiselt koosneb emitterist (n-pooljuhist) baasi (p-pooljuhti) difundeeruvatest elektronidest. Kuna baas on väga õhuke ning põhiliste laengukandjate (aukude) kontsentratsioon temas on tunduvalt väiksem kui elektronide kontsentratsioon emitteris, siis järelikult hõivatakse baasi aukude poolt (rekombineeruvad) ainult vähesed emitterist baasi difundeerunud elektronidest. Need elektronid lahkuvad baasist väljaviigijuhtme kaudu pingeallika E_1 positiivsele poolusele, tekitades baasivoolu I_B , mis tagab baasi neutraalsuse.

Enamik baasi tunginud elektronidest läbivad baasi ning satuvad kollektorsiirde elektrivälja, mis on sellise suunaga, et ta soodustab elektronide edasist liikumist baasist kollektorisse. Kollektorsiirde vastupidisel pingestamisel suureneb kollektori potentsiaal baasi suhtes (potentsiaalbarjääri kõrgus suurenes), kuid just see ongi elektronide edasist liikumist soodustav asjaolu, sest meenutame, et elektriväljas liiguvad elektronid väiksema potentsiaaliga välja punktist suurema potentsiaaliga välja punkti suunas (e. väljatugevuse vektori suunale vastupidises suunas).

Kollektorist liiguvad elektronid läbi juhtme pingeallika E_2 positiivsele poolusele, tekitades seega kollektorivoolu I_K . Eespool toodud arutluste põhjal võib järeldada, et

$$I_E = I_B + I_K. \quad (1)$$

Ülaltooduga analoogiliselt võib vaadelda p-n-p tüüpi transistori töötamise põhimõtet. Mõlemat tüüpi transistori jaoks võib tööpõhimõtet kokkuvõtlikult selgitada järgmiselt. Baasi ja emitteri vahele rakendatud väikese päripinge mõjul avatakse emittersiire ning emitterist liiguvad baasi tema



Joon. 2. Füüsikalised protsessid n-p-n transistoris.

- a) Emitter - baas pingestatakse pärisuunas, baas - kollektor aga vastupidises suunas. $\ominus \rightarrow$ näitab elektronide liikumise suunda välises vooluringis.
- b) Emittersiirdel AB potentsiaalbarjääri kõrgus väheneb, kollektorsiirdel CD aga suureneb.

\vec{E}_K on ruumlaengute, \vec{E}_V aga välise pingesallika poolt tekitatud väljatugevuse vektor.

suhtes mittepõhilised laengukandjad. Ainult väike osa neist rekombineerub baasi põhiliste laengukandjatega, tekitades nõrga baasivoolu; enamik neist aga siirdub kollektorsiirde piirkonda. Kollektori ja baasi vahele rakendatakse vastupinge, mis aga baasi suhtes mittepõhilistele laengukandjatele toimib päripingena, seetõttu nad liiguvad baasist kollektorisse, tekitades kollektorivoolu. Kollektorivool on peaaegu võrdne emitterivooluga ja nad mõlemad on tunduvalt suuremad baasivoolust.

Väikese võimsusega transistoritel on tavaliselt kollektorpinge U_{KE} suurusjärgult 5...20 V, baasipinge $U_{BE} \approx 0,1 \dots 0,5$ V, kollektorivool $I_K \approx 1 \dots 10$ mA ja baasivool $I_B \approx 50 \dots 200 \mu A$.

2. Transistori kasutamisest signaalide võimendamisel.

Üheks transistori tähtsaimaks omaduseks on see, et tema kõik kolm voolu - I_E , I_B ja I_K muutuvad ligikaudu võrdeliselt üksteisega. Olgu näiteks vooludel järgmised tugevused $I_E = 10$ mA, $I_B = 0,5$ mA ja $I_K = 9,5$ mA. Kui nüüd baasivool näiteks suureneb 20 %, s.t. $I_B = 0,5 + 0,1 = 0,6$ mA, siis ka kõik teised voolud suurenevad 20 %, s.t. $I_E = 10 + 2 = 12$ mA ja $I_K = 9,5 + 1,9 = 11,4$ mA. Voolude võrdeline sõltuvus järeldub võrdusest (1), mis peab alati kehtima. Sellest võrdusest järeldub, et voolude muutuste jaoks kehtib

$$\Delta I_E = \Delta I_B + \Delta I_K. \quad (2)$$

Eespool selgitasime, et emitteri ja baasi vahelise väikese päripinge U_{BE} rakendamisel tekivad baasivoolust tunduvalt suurema voolutugevusega emitteri- ja kollektorivoolud. Kui muuta U_{BE} väärtust teatud piirides, siis muutuvad ka voolud I_E , I_B , I_K . Voolude omavahelisest võrdelisusest järeldub, et baasivoolu väikese muutusega kaasnevad tunduvalt suuremad emitterivoolu ja kollektorivoolu muutused. Niisiis selgub, et väikese sisend- e. baasivõimsusega $P_B = I_B \cdot U_{BE}$ saame tüürida tunduvalt suuremat väljund- e. kollektorivõimsust $P_K = I_K \cdot U_{KE}$. Sellist nähtust nimetamegi võimendamiseks.

Transistori ja vaakumtrioodi vahel on olemas teatav analoogia: baas sarnaneb trioodi võrega, emitter katoodiga ja kollektor anoodiga. Trioodis juhitakse võimendav signaal võrele, transistoris baasile. Oluline erinevus on siinjuures see, et trioodi korral võrevoolu praktiliselt ei esine (võre ei tarbi võimsust), transistori korral on aga baasivool (kuigi väike) alati olemas, sest muidu transistor ei töötaks.

3. Transistori põhiparameetrid.

Transistori võimendavad omadused loetakse määratuks, kui on teada voolu, pinge ja võimsusvõimenduse tegur, tõus, sisend- ning väljundtakistused. Need suurused sõltuvad transistori lülitusest, milleks on kas ühise baasiga (ÜB), ühise kollektoriga (ÜK) või ühise emitteriga (ÜE) lülitis. Kõige enam kasutatav on ÜE lülitis (vt. joon. 3).

Vooluvõimendusteguriks β ÜE lülituses nimetatakse kollektorivoolu väikese muutuse suhet seda esile kutsunud baasivoolu muutuses konstantsel kollektorpingel

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}, \text{ kui } U_{KE} = \text{const.} \quad (3)$$

Sisendtakistus on baasipinge väikese muutuse ja sellest tingitud baasivoolu muutuse suhe konstantsel kollektorpingel

$$R_{\text{sis}} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}, \text{ kui } U_{KE} = \text{const.} \quad (4)$$

R_{sis} iseloomustab emitteri- ja baasivahelist takistust.

Tõusus nimetatakse kollektorivoolu väikese muutuse ning seda põhjustanud baasipinge muutuse suhet konstantsel kollektorpingel

$$S = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{BE}}, \text{ kui } U_{KE} = \text{const.} \quad (5)$$

Valemite (3) ja (4) põhjal on selge, et

$$\beta = S \cdot R_{\text{sis}}, \quad (6)$$

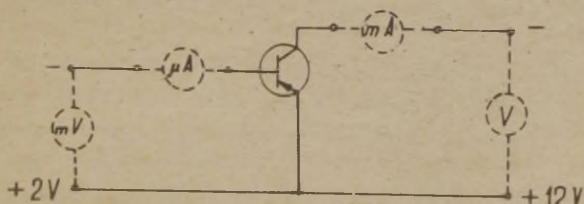
Transistori väljundtakistuseks nimetatakse kollektorpinge väikese muutuse ja tema poolt esilekutsutud kollektori-voolu muutuse suhet konstantsel baasipingel

$$R_{\text{välj}} = \frac{\Delta U_{\text{KE}}}{\Delta I_{\text{K}}}, \text{ kui } U_{\text{BE}} = \text{const.} \quad (7)$$

Käesolevas töös võetakse üles transistori staatilisised karakteristikud, mis näitavad, kuidas muutuvad meid huvitavad pinged ja voolud koormuse puudumisel kollektorahelas. Dünaamiliste karakteristikute ülesvõtmiseks lülitatakse kollektorahelasse koormustakisti. Käesolevas töös seda ei tehta.

Töö käik

1. Karakteristikute ülesvõtmiseks teha ühendused vastavalt joonisele 3. Transistori kollektorahelaga ühendatakse vooluallika klemmid, milledevaheline pinge on muudetav 0 kuni +12 V ja baasiahelaga vooluallika klemmid, milledevaheline pinge on muudetav 0 kuni +2 V. Emitter ühendatakse toiteallika plussklemmiga (plussklemmid on toiteallika sees kokku ühendatud).



Joon. 3. Skeem UE lülituses p-n-p tüüpi transistori põhiparameetrite määramiseks.

NB! Kõikidel mõõtmistel jälgida, et transistori kollektori-
vool ei ületaks 10 mA ja baasivool 500 μ A (miks?).

2. Sisendkarakteristikuks on baasivoolu tugevuse sõltu-
vus baasipingest konstantsel kollektoripingel $I_B = f(U_{BE})$,
 $U_{KE} = \text{const}$.

Sisendkarakteristikute mõõtmiseks reguleerida baaspinget
0,02 või 0,04 V kaupa piirides 0 kuni 0,3 või 0,4 V, kandes
tabelisse 1 I_B ja I_K suurused vastavalt mikro- ja milliam-
permeetri näitudele. Mõõtmised teostada kollektoripingel 4,5
ja 12 V.

Tabel 1

$U_{KE} =$		
U_{BE} (V)	I_B (μ A)	I_K (mA)

Tabelis 1 esitatud tulemuste põhjal joonestada milli-
meeterpaberil sõltuvused $I_B = f(U_{BE})$, $I_K = f(U_{BE})$ ja $I_K =$
 $= f(I_B)$ erinevate kollektorpingete $U_{KE} = 4,5$ V ja 12 V
jaoks. Graafikute abil määrata:

- sõltuvuse $I_B = f(U_{BE})$ põhjal - sisendtakistus R_S ;
- sõltuvuse $I_K = f(U_{BE})$ põhjal - tõus S;
- vooluvõimendustegur β - sisendtakistuse ja tõusu
korrutisena;
- sõltuvuse $I_K = f(I_B)$ põhjal - vooluvõimendustegur β .

3. Väljundkarakteristikuks on kollektorivoolu tugevuse
sõltuvus kollektorpingest konstantse baasipinge (või kons-
tantse baasivoolu) korral $I_K = f(U_K)$, $U_{BE} = \text{const}$ (või $I_B =$
 $= \text{const}$).

Väljundkarakteristikute mõõtmiseks reguleeritakse baa-
sipingeks 150 mV, mis hoitakse mõõtmise käigus konstantne.
Edasi mõõdetakse kollektorivool, tõstes kollektorpinget 1 V
kaupa kuni 9 V (12 V). Karakteristiku algusosa saamiseks
tuleb reguleerida kollektorpinget 0,2 V kaupa piirides

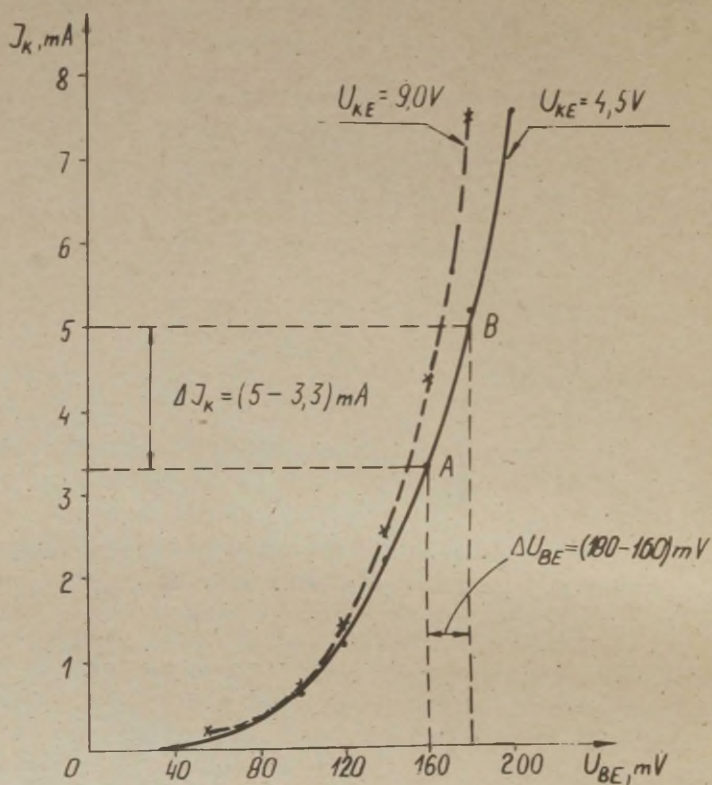
0...1 V. Samu mõõtmisi korrata baaspingel 200 mV. Mõõtmistulemused kanda tabelisse 2. Väljundkarakteristikuid võib määrata ka nii, et registreerime I_K väärtused, muutes ülal kirjeldatud viisil U_{KE} -d, kuid hoides samal ajal baasivoolu konstantse (näiteks 30 μA , 50 μA ja 100 μA). Kumba varianti kasutada - seda otsustab juhendaja.

Tabel 2

I_B või $U_{BE} = \dots$	
U_{KE} (V)	I_K (mA)

Tabelis 2 esitatud tulemuste põhjal joonestada millimeeterpaberil sõltuvused $I_K = f(U_{KE})$ erinevate U_{BE} konstantsete väärtuste (150 mV ja 200 mV) või erinevate I_B konstantsete väärtuste (näiteks 30 μA ja 100 μA) korral. Graafikute abil määrata väljundtakistus R_V .

4. Parameetrite määramisel graafikutelt pidada silmas järgmist. Valida telgedel sobiv mastaap ja märkida ühik, millega suurust mõõdetakse; orienteeruvalt on sobivaks millimeeterpaber mõõdetega ca 20 cm x 28 cm. Kui katsetulemused hajuvad, siis tuleb sõltuvuse väljajoonestamisel neid keskmistada (siluda). Parameetrite arvutamisel graafikute põhjal tuleb sõltuvuste lineaarses osas eraldada piisavalt väike sirglõik AB (vt. joon. 4). Selle sirglõigu otspunktile vastavate füüsikaliste suuruste väärtused ja nende muudud määrame horisontaal- ja vertikaalteljelt. Parameetrite väljaarvutamisel jälgida, et suurused, milledega arvutusi tehakse, oleksid avaldatud põhiühikute kaudu. Parameetrite määramise näitena on joonisel 4 toodud tõusu S määramine graafikult $I_K = f(U_{BE})$. Joonise 4. põhjal saame, et



Joon. 4. Tõusu S määramine sõltuvuse $I_K = f(U_{BE})$ põhjal.

$$S = \frac{1,7 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{20 \cdot 10^{-3} \text{ V}} = 8,5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{A}}{\text{V}},$$

kui $U_{KE} = 4,5 \text{ V}$.

5. Mõõtmistulemuste põhjal leida, kui suur on transistori pingevõimendus ja võimsusvõimendus. Võrrelda leitud suurusi vaakumtrioodi samade parameetritega. Uurida võimalusi parameetrite teistsuguseks määramiseks (vt. näiteks R_v määramine sõltuvusest $I_K = f(U_B)$ jt.).

Lisaküsimusi

1. Selgitada mõisteid elektriväli, pinge ja potentsiaal.
2. Kuidas tuleks pingestada p-n-p tüüpi transistorit?
3. Kuidas mõjub transistori tööle tema soojenemine?
4. Kuidas kasutada transistorit elektriliste signaalide võimendamisel?
5. Kuidas tekib siiretele potentsiaalbarjäär?
6. Selgitada pooljuhtide n ja p juhtivust, lähtudes liisandite olemasolust.
7. Selgitada p-n-p tüüpi transistori tööpõhimõtet.
8. Miks ei vaadelda pooljuhis ioonide liikumist?
9. Selgitada, kuidas käitub n-p-n transistor, kui pingestada kollektor emitteri suhtes negatiivselt?

Kirjandus

1. Keskkooliõpik.
2. Ливенцев Н.М. Курс физики, М., "Высшая школа", 1978, с. II0-II4, I75-I88.

TAKISTUSSIDESTUSEGA VÕIMENDI UURIMINE

Tööülesanne

Tutvumine takistussidestusega võimendiga. Võimendi saaduskarakteristiku sõltuvuse määramine skeemi parameetritest. Tutvumine moonutustega.

Töövahendid

Paneel võimendiga, signaalgeneraator, lampvoltmeetrid, ostsillograaf, juhtmed.

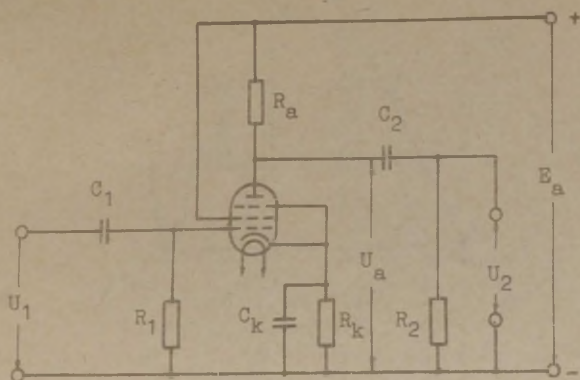
Sissejuhatus

Võimendi ülesandeks on suurendada välise energiaallika arvel sisendsignaali võimsust või amplituudi. Üheks levi-
numaks madalsageduslike võimendite tüübiks on takistussidestusega võimendi (joon. 1).

Sisendsignaali (sisendpinge U_1) juhitakse pentooli tüürvõrele üle kondensaatori C_1 . Kondensaator laseb edasi ainult sisendsignaali vahelduvkomponendi. Võrepinge muutused kutsuvad esile lambi anoodvoolu muutusi, mistõttu hakkab muutuma pinge $U_{Ra} = I_a R_a$ anoodkoormustakistil R_a . Kuna

$$E_a = I_a R_a + U_a = \text{const}, \quad (1)$$

kus E_a on toiteallika pinge, siis muutub ka lambi anoodpinge U_a . Anoodpinge muutuste vahelduvkomponendi (võimen-

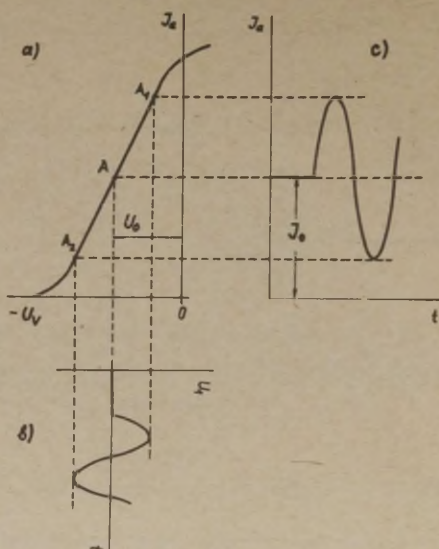


Joon. 1. Takistussidestusega võimendi ühe astme skeem.

datud pinge U_2) võib juhtida üle kondensaatori C_2 järgmise astme tüürvõrele (kui ühe astme võimendusest ei piisa).

Anoodvoolu sõltuvust võrepingest mingite, vaadeldavas protsessis muutumatute E_a ja R_a väärtuste korral nimetatakse lambi anood-võre dünaamiliseks karakteristikuks (joon. 2a). Vaatleme pingevõimendi tööd lambi anood-võre dünaamilise karakteristiku abil. Kui sisendis puudub signaal U_1 , siis tööpunkti A asukoht karakteristikul on määratud võrepingega U_0 (negatiivne võre eelpinge) ning lampi läbib vastav muutumatu väärtusega anoodvool I_0 . (joon. 2c).

Vahelduvpinge U_1 andmisel võimendi sisendklemmidele (joon. 1) liitub vahelduvpinge U_1 alalispingele U_0 ning pinge pentoodi tüürvõrel (joon. 2b) hakkab muutuma samas taktis sisendisse antud vahelduvpingega. Anood-võre karakteristikult näeme, et võrepinge U_v negatiivsemaks muutudes anoodvoolu I_a väärtus väheneb, võrepinge positiivsemaks muutumisel (nullile lähenemisel) aga kasvab. Jälgides, kuidas graafikud a, b ja c joonisel 2 on omavahel



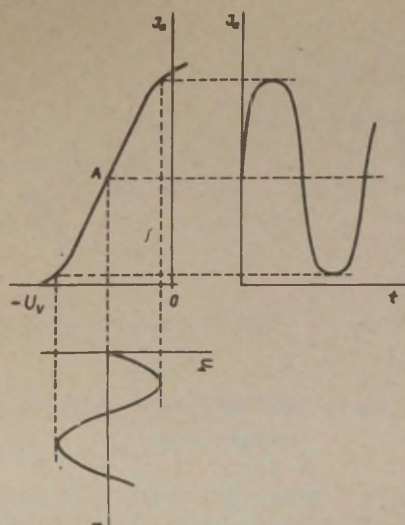
Joon. 2. a) Anood-võre dünaamiline karakteristik
 b) Pinge muutumine pentoodi tüürvõrel
 c) Anoodvoolu sõltuvus ajast

punktiirjoontega ühendatud, näeme, et pinge muutumise tõttu lambi võrel hakkab ka tööpunkti A asukoht võnkuma asendite A_1 ja A_2 vahel ning seega ka pentoodi seni muutumatu anoodvool hakkab muutuma samas taktis teatud väärtuste vahel (joon. 2c).

Sisendsignaali kasvades võrepinge amplituud võib väljuda karakteristiku lineaarsest piirkonnast ja anoodvool ei saa muutuda enam võrdeliselt võrepingega (joon. 3). Tekivad võimendatud signaali mittelineaarmoonutused, s.t. väljundsignaali kuju ei sarnane enam sisendsignaali kujuga.

Peamine võimendi tööd iseloomustav parameeter on võimendustegur K , mis võrdub väljund- ja sisendpinge amplituudide suhtega

$$K = \frac{U_2}{U_1} . \quad (2)$$



Joon. 3. Mittelineaarmoonutuste tekkimine.

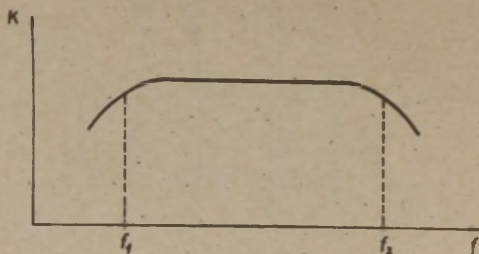
Keskmiitel sagedustel astme võimendustegur ei sõltu signaali sagedustest ja võrdub

$$K = \mu \frac{R_a}{R_a + R_1}, \quad (3)$$

kus R_a on anoodkoormustakisti takistus, R_1 - lambi sisetakistus ja μ - lambi võimendustegur.

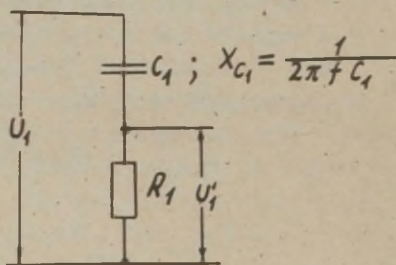
Peale võimendusteguri on võimendi teiseks tähtsaks näitajaks tema sageduskarakteristik, s.o. võimendusteguri K sõltuvus võimendatavast sagedusest f . Joonisel 4 on toodud takistussidestusega võimendile iseloomulik sageduskarakteristik. Sageduse vahemikku $f_1 \dots f_2$, mille ulatuses võimendustegur vähe sõltub võimendatavast sagedusest, nimetatakse võimendi läbilaskeribaks (tavaliselt nõutakse, et võimendusteguri K langus piirsagedustel f_1 ja f_2 ei ületaks 3 dB).

Võimendi valimisel tuleb jälgida, et selle läbilaskeribavestaks sisendsignaali sagedusribale, vastasel korral teki-
vad sageduslikud moonutused, s.t. väljundsignaalis ei ole ühtlaselt võimendatud kõik sisendsignaali sagedused.



Joon. 4. Takistussidestusega võimendi sagedus-
karakteristik.

Võimendusteguri languse piirsagedustel (suurel ja väikestel sagedustel) põhjustavad võimendi lülituselemendid, millede parameetrid sõltuvad sagedusest (kondensaatorid, poolid, aga ka parasiitmahtuvused ja -induktiivsused. Võimendusastme sisend- ja väljundlülitus on vaadeldav potentsiomeetrina (joon. 5), kus kondensaatori C_1 mahtuvuslik takistus X_{C_1} sõltub sagedusest. On ilmne, et sageduse vähenedes see kasvab ja lambi võrele antav pinge U_1' (sõltub X_{C_1} ja R_1 vahekorrast) langeb, mistõttu väheneb ka väljundsignaali suurus (võimendus langeb). Signaaliga paralleelsed mahtuvused (näiteks parasiitmahtuvus), lühistavad signaali rohkem kõrgetel sagedustel, põhjustades seal võimenduse languse.



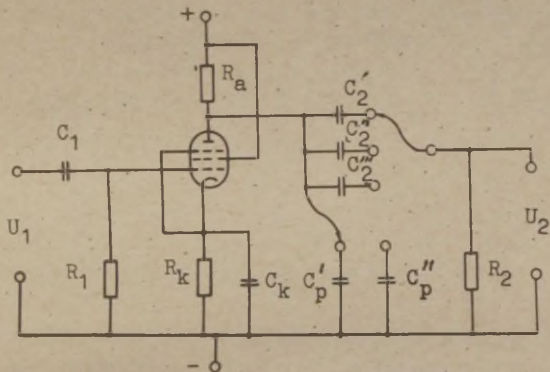
Joon. 5. Võimendusastme sisendlülitus.

Töö käik

1. Võimendi sagedusarakteristikute ülesvõtmine.

Uuritava võimendi skeem on toodud joonisel 6. Skeem on monteeritud plastmassist paneelile. Pentoodi tüüp on 6Ж17.

Üles võtta tuleb kaks karakteristikut, erinevatel juhendaaja poolt antud C_2 ja C_p väärtustel.



Joon. 6. Uuritava võimendi skeem.

Võimendi karakteristikute ülesvõtmiseks koostame katse-skeemi vastavalt joonisele 7. Riistade maandatavad klemmid ühendame võimendi miinusklemmidega.

Pärast skeemi kontrollimist juhendaja poolt lülitame riistad sisse ja laseme neil soojeneda 4...5 min. Anname generaatorist võimendisse sisendpinge ja reguleerime parajaks väljundsignaali kujutise ostsillograafi ekraanil. Jätame nüüd sisendpinge muutmatuks ja muudame generaatori sagedust üle terve selle sageduspiirkonna, kontrollides ostsillograafi abil, et kusagil ei tekiks moonutusi. Kui mõnel sagedusel moonutused siiski tekivad, tuleb sisendpinget vähendada. Valitud sisendpinge hoiame konstantse terve sa-

geduskarakteristiku ülesvõtmise jooksul. Mõõdame vaäljund-
 pinge suurused järgmistel sagedustel: 50, 60, 80, 100, 150,
 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000,
 5000, 6000, 8000, 10 000, 15 000, 20,000, 30 000, 40 000,
 50 000, 60 000, 80 000, 100 000 Hz.

Mõõtandaed kanname järgmistesse tabelitesse.

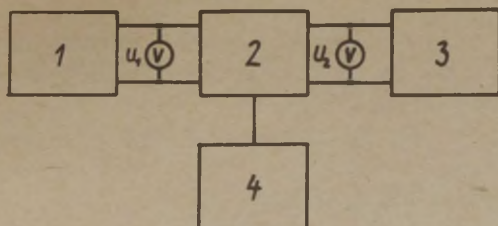
$C_2 =$		$C_p =$	
Sagedus f (Hz)	Sisendpinge $U_1(V)$	Väljundpinge $U_2(V)$	Võimendus- tegur K

Saadud andmete põhjal joonestame karakteristikud (mõle-
 mad ühis koordinaadistikus) poollogaritmilisel paberil (K-
 lineaaarses, f - logaritmilises mastaabis).

Analüüsiä tulemusi. Leiaäe võimendi läbilaskeriba.

2. Moonutuste jälgimine.

Kasutame eelmise ülesande lülitusskeemi (joon. 7). Vali-
 me mingisuguse võimendi läbilaskeriba keskel asuva sageduse
 ja hakkame suurendama aeglaselt sisendpinget. Fikseerime, kui
 suure sisendpinge puhul hakkavad moonutused tekkima. Joonis-
 tame üles moonutamata, väikeste moonutustega ja suurte moo-
 nutustega väljundsignaali kuju. Analüüsiä jälgitavate moo-
 nutuste põhjusi.



Joon.7. Katseskeem.

1 - helisagedusgeneraator; 2 - uuritav võimendi; 3 - ost-silloograaf; 4 - võimendi anood- ja küttepingeallikad. Pingeid U_1 ja U_2 mõõdetakse lampvoltmeetriga. Kui kasutataval helisagedusgeneraatoril on voltmeeter sisse ehitatud, siis eraldi voltmeetrit U_1 mõõtmiseks ei ole vaja.

Lisaküsimusi

1. Miks antakse võimendi lampide tüürvõrele negatiivne eelpinge?
2. Miks takistussidestusega võimendis eelmise lambi anood ühendatakse järgmise lambi võrega üle kondensaatori?
3. Kuidas tekitatakse lambi tüürvõrel negatiivne eelpinge?
4. Kuidas mõjutab tööpunkti valik karakteristikul mitte-lineaarseid moonutusi?
5. Miks triood ei kõlba kõrgete sageduste võimendamiseks?
6. Missugune on kardiograafi võimendi läbilaskeriba?
7. Missugune on läbilaskeriba raadiovastuvõtja helisagedusvõimendil?
8. Missugused parasitmahtuvused esinevad võimendis ja milline on nende mõju sageduskarakteristikule?
9. Kuidas Teie arvates peaks kõlama raadioülekanne, kui vastuvõtjas helisagedusvõimendi asemel kasutada kardiograafi võimendit?
10. Miks võimendi võrekondensaatorite mahtuvuste vähendamisel sageduskarakteristiku madalsageduslik piir nihkub kõrgete sageduste suunas?

11. Kuidas muutub võimendi sageduskarakteristik, kui selle lampi šunteerida kondensaatoriga (anoodi ja miinusjuhtme vahele lülitada kondensaator)?

12. Kuidas võib laiendada võimendi läbilaskeriba mõlemas suunas?

13. Miks sageduskarakteristiku ülesvõtmisel tuleb üheaegselt generaatori sagedusega muuta ka ostsillograafi hälvitussagedust?

14. Tihti lülitatakse sageduskarakteristikute korrigeerimiseks võimendi anoodkoormustakistiga järjestikku pool (induktiivsus). Kuidas muutub sellisel juhul sageduskarakteristik?

15. Kuidas saaksime võimendi sageduskarakteristiku, mille ordinaatteljel oleks antud võimendustegur dB-des lineaarses mastaabis?

Kirjandus

1. Ливенцев Н.М. Курс физики. М., "Высшая школа", 1978, с. 169-172.

ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
МЕДИЦИНСКОГО ФАКУЛЬТЕТА. II.
Составитель Тоомас Мюйрсепп.
На эстонском языке.
Тартуский государственный университет.
СССР, 202400, г.Тарту, ул.Оликобли, 18.
Vastutav toimetaja T. Mürsepp.
Paljundamisele antud 22.10.1987.
Formaat 60x84/16.
Rotaatoripaber.
Masinakiri. Rotaprint.
Tingtrükipoognaid 3,95.
Arvestuspoognaid 3,62. Trükipoognaid 4,25.
Trükiarv 400.
Tell. nr. 916.
Hind 10 kop.
TRÜ trükikoda. ENSV, 202400 Tartu, Tiigi t. 78.